

Руководство по гидрологической практике

Том II

Управление водными ресурсами и практика
применения гидрологических методов



Всемирная
Метеорологическая
Организация

ВМО-№ 168

Погода • Климат • Вода

Руководство по гидрологической практике

Том II
Управление водными ресурсами и практика
применения гидрологических методов

Шестое издание

2012



Всемирная
Метеорологическая
Организация

Погода • Климат • Вода

ВМО-№ 168

© Всемирная Метеорологическая Организация, 2009

Право на опубликование в печатной, электронной или какой-либо иной форме на каком-либо языке сохраняется за ВМО. Небольшие выдержки из публикаций ВМО могут воспроизводиться без разрешения при условии четкого указания источника в полном объеме. Корреспонденцию редакционного характера и запросы в отношении частичного или полного опубликования, воспроизведения или перевода настоящей публикации следует направлять по адресу:

Chair, Publications Board
World Meteorological Organization (WMO)
7 bis, avenue de la Paix
P.O. Box 2300
CH-1211 Geneva 2, Switzerland

Тел.: +41 (0) 22 730 84 03
Факс: +41 (0) 22 730 80 40
Э-почта: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-40168-7

ПРИМЕЧАНИЕ

Обозначения, употребляемые в публикациях ВМО, а также изложение материала в настоящей публикации не означают выражения со стороны Секретариата ВМО какого бы то ни было мнения в отношении правового статуса какой-либо страны, территории, города или района, или их властей, а также в отношении делимитации их границ.

Мнения, выраженные в публикациях ВМО, принадлежат авторам и не обязательно отражают точку зрения ВМО. Упоминание отдельных компаний или какой-либо продукции не означает, что они одобрены или рекомендованы ВМО и что им отдается предпочтение перед другими аналогичными, но не упомянутыми или не прорекламированными компаниями или продукцией.

ТОМ II
ТАБЛИЦА ПОЛУЧЕННЫХ ДОПОЛНЕНИЙ

Дополнение №	Дата	Добавлено	
		Кем	Когда
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
ПРЕДИСЛОВИЕ	xi
ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ	xiii
ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ	II.1-1
1.1 Общие сведения	II.1-1
1.2 Предмет Руководства	II.1-1
1.3 Содержание Руководства	II.1-2
1.4 Гидрологическая оперативная многоцелевая система	II.1-4
Ссылки и дополнительная литература	II.1-4
ГЛАВА 2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ СЛУЖБЫ	II.2-1
2.1 Введение	II.2-1
2.2 Обязанности и функции гидрологических служб	II.2-1
2.2.1 Характер продукции и обслуживания гидрологической службы	II.2-2
2.2.2 Пользователи гидрологической продукции и обслуживания	II.2-2
2.2.3 Поддержание деловых отношений с клиентами	II.2-3
2.2.4 Гидрологическая продукция и обслуживание	II.2-3
2.2.5 Функции и виды деятельности гидрологической службы	II.2-4
2.2.6 Оценка продукции и обслуживания и менеджмент качества	II.2-5
2.2.7 Правовая основа для ведения деятельности и организационные аспекты	II.2-6
2.2.8 Поддержание деловых отношений с другими учреждениями	II.2-7
2.2.9 Обмен данными	II.2-8
2.3 Планирование и стратегия	II.2-9
2.4 Управление людскими ресурсами и наращивание потенциала	II.2-11
2.4.1 Управление	II.2-11
2.4.2 Подготовка и переподготовка кадров	II.2-12
2.5 Управление финансами и ресурсами	II.2-12
2.5.1 Источники дохода	II.2-13
2.5.2 Составление бюджета и контроль финансовой деятельности	II.2-14
2.5.3 Управление материальными ресурсами	II.2-14
2.5.4 Безопасность баз данных	II.2-14
Ссылки и дополнительная литература	II.2-15
ГЛАВА 3. КОМПЛЕКСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ	II.3-1
3.1 Введение	II.3-1
3.1.1 Устойчивое развитие водного хозяйства	II.3-1
3.1.2 Меняющийся характер ресурсов	II.3-1
3.1.3 Меняющиеся подходы к управлению водным хозяйством	II.3-2
3.2 Комплексное управление водными ресурсами	II.3-3
3.3 Логическое обоснование комплексного управления водными ресурсами	II.3-4
3.3.1 Количество и качество воды	II.3-4
3.3.2 Поверхностные и грунтовые воды	II.3-4
3.3.3 Рассмотрение вопросов взаимодействия стока выше и ниже по течению	II.3-5
3.3.4 Водные, земельные и другие системы ресурсов	II.3-5
3.3.5 Окружающая среда, экономика и общество	II.3-5

3.3.6	Вертикальная и горизонтальная фрагментация: обычные и цилиндрические управленческие системы	II.3-6
3.3.7	Сотрудничество, координация и согласованность	II.3-7
3.4	Эволюция комплексного управления водными ресурсами	II.3-7
3.4.1	Соединенные Штаты Америки: охраняемые природные территории Огайо, Управление ресурсами бассейна реки Теннесси	II.3-7
3.4.2	Канада: природоохранные органы власти	II.3-8
3.4.3	США и Канада: Великие озера	II.3-8
3.4.4	Австралия: общее управление водными и земельными ресурсами водосборного бассейна	II.3-9
3.4.5	Новая Зеландия: закон об управлении ресурсами	II.3-9
3.4.6	Южная Африка	II.3-9
3.5	Перспективы комплексного управления водными ресурсами	II.3-10
3.5.1	Дублинская конференция: Встреча на высшем уровне «Планета Земля», 1992 г.	II.3-10
3.5.2	Всемирный совет по водным проблемам и всемирные форумы по водным проблемам	II.3-11
3.5.3	Глобальное водное партнерство	II.3-12
3.5.4	Всемирная встреча на высшем уровне по устойчивому развитию (Йоханнесбург, 2002 г.)	II.3-12
3.6	Элементы передовой практики в области комплексного управления водными ресурсами	II.3-12
3.6.1	Альтернативные интерпретации: всеобъемлющий подход по отношению к комплексному подходу	II.3-12
3.6.2	Видение ожидаемого будущего	II.3-13
3.6.3	Пространственный масштаб: водосбор, частный водосбор, приток и экологическая зона	II.3-13
3.6.4	Партнерства и союзы	II.3-14
3.6.5	Связь с региональным планированием и оценка воздействия	II.3-15
3.6.6	Разработка институциональных механизмов	II.3-15
3.6.7	Мониторинг и оценка	II.3-16
3.7	Предостережения относительно комплексного управления водными ресурсами	II.3-17
3.7.1	Когда применять комплексное управление водными ресурсами	II.3-17
3.7.2	Проблемы осуществления	II.3-17
	Ссылки и дополнительная литература	II.3-17
	ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ ВОДНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ	II.4-1
4.1	Оценка водных ресурсов и водохозяйственные проекты	II.4-1
4.1.1	Необходимость оценки водных ресурсов	II.4-1
4.1.2	Компоненты программы по оценке водных ресурсов	II.4-1
4.1.3	Анализ деятельности по оценке водных ресурсов	II.4-3
4.1.4	Водохозяйственные проекты	II.4-3
4.1.5	Цели водохозяйственного проекта	II.4-4
4.1.6	Многоцелевые проекты	II.4-4
4.1.7	Проектный цикл	II.4-4
4.1.8	Предварительные исследования в целях водохозяйственного проектирования	II.4-4
4.2	Оценка емкости водохранилища и его водоотдачи	II.4-8
4.2.1	Общие положения	II.4-8
4.2.2	Понятие водоотдачи	II.4-9
4.2.3	Оценка соотношения «емкость–водоотдача»	II.4-11
4.2.4	Классификация водоотдачи.....	II.4-13
4.2.5	Вероятностный метод	II.4-14
4.2.6	Многоцелевые водохранилища и правила управления водохранилищами	II.4-17
4.2.7	Системы водных ресурсов с каскадом водохранилищ	II.4-18
4.2.8	Побочные эффекты от сооружения водохранилищ	II.4-19

Стр.

4.2.9	Оценка емкости водохранилища методами дистанционного зондирования	II.4-20
4.2.10	Изменение климата	II.4-20
4.3	Регулирование паводков	II.4-21
4.3.1	Общие положения	II.4-21
4.3.2	Стратегии регулирования паводков	II.4-21
4.3.3	Комплексное регулирование паводков	II.4-22
4.3.4	Меры, связанные со строительством сооружений	II.4-23
4.3.5	Мероприятия, не связанные со строительством сооружений	II.4-28
4.3.6	Управление при чрезвычайных обстоятельствах, вызванных паводками ...	II.4-31
4.4	Орошение и осушение	II.4-33
4.4.1	Орошение	II.4-33
4.4.2	Осушение сельскохозяйственных земель	II.4-42
4.4.3	Использование дистанционного зондирования и общих информационных систем в орошении и осушении	II.4-45
4.5	Гидроэнергетические и другие энергетические проекты	II.4-46
4.5.1	Общие положения	II.4-46
4.5.2	Гидроэлектроэнергия	II.4-46
4.5.3	Функционирование гидроэлектрической системы	II.4-56
4.5.4	Сопутствующие энергетические проекты	II.4-56
4.6	Судоходство и регулирование речного русла	II.4-58
4.6.1	Применение гидрологии для судоходства	II.4-58
4.6.2	Классификация русловыправительных работ	II.4-64
4.6.3	Факторы эрозии, обусловленные русловым потоком	II.4-66
4.6.4	Факторы эрозии, вызванные волнами и судами	II.4-66
4.6.5	Эволюция и характерные черты речных излучин	II.4-67
4.6.6	Определение расчетных расходов и уровней	II.4-68
4.7	Управление водными ресурсами на урбанизированных территориях	II.4-69
4.7.1	Общие положения	II.4-69
4.7.2	Влияние урбанизации	II.4-70
4.7.3	Проектирование городского ливневого дренажа	II.4-71
4.7.4	Меры контроля городского дренажа	II.4-76
4.7.5	Управление городским дренажом	II.4-77
4.7.6	Оценочные показатели землепользования, получаемые с использованием методов дистанционного зондирования	II.4-79
4.8	Перенос наносов и морфология речных русел	II.4-79
4.8.1	Общие положения	II.4-79
4.8.2	Эрозия на речных водосборах	II.4-79
4.8.3	Русловая эрозия	II.4-79
4.8.4	Речные системы	II.4-80
4.8.5	Режимы течения и русловые формы	II.4-81
4.8.6	Перенос наносов в руслах	II.4-84
4.8.7	Отложение наносов	II.4-87
4.8.8	Меры по регулированию стока наносов	II.4-87
4.9	Качество воды и сохранение водных экосистем	II.4-88
4.9.1	Общие положения	II.4-88
4.9.2	Связь между количеством и качеством воды	II.4-88
4.9.3	Влияние водохозяйственных проектов на качество воды ручьев и рек	II.4-90
4.9.4	Влияние водохозяйственных проектов на качество вод крупных озер и водохранилищ	II.4-91
4.9.5	Изменение качества воды под влиянием сброса загрязняющих веществ ...	II.4-91
4.9.6	Меры по уменьшению воздействия загрязнения на качество воды ...	II.4-93
4.10	Гидроэкология	II.4-93
4.10.1	Введение	II.4-93
4.10.2	Охрана и рациональное использование речных систем	II.4-94
4.10.3	Основные представления о речной морфологии и экологии	II.4-96

4.10.4	Экологические последствия водохозяйственных проектов	II.4-100
4.10.5	Смягчение экологических воздействий	II.4-102
Ссылки и дополнительная литература		II.4-104
ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ		II.5-1
5.1	Введение	II.5-1
5.2	Статистические ряды и периоды повторяемости	II.5-2
5.3	Вероятностное распределение, используемое в гидрологии	II.5-3
5.3.1	Семейство нормальных распределений: N, LN и LN3	II.5-4
5.3.2	Распределение экстремальных значений: распределение Гамбла, обобщенных экстремальных значений и Вейбулла	II.5-4
5.3.3	Семейство распределений Пирсона III-го типа	II.5-6
5.3.4	Семейство распределений Халфена: типы A, B и B ⁻¹	II.5-7
5.3.5	Обобщенное логистическое распределение	II.5-7
5.3.6	Обобщенное распределение Парето	II.5-7
5.3.7	Непараметрический метод оценивания плотности	II.5-7
5.4	Проверки статистических гипотез	II.5-8
5.4.1	Проверка независимости и стационарности по критерию Вальда-Вульфовитца	II.5-8
5.4.2	Проверка Манна-Кендалла для обнаружения тренда	II.5-8
5.4.3	Проверка однородности и стационарности по критерию Манна-Уитни (скачки)	II.5-10
5.4.4	Размер выборки и продолжительность ряда наблюдений	II.5-10
5.4.5	Проверка Граббса и Бека на обнаружение выбросов	II.5-10
5.4.6	Байесовские процедуры	II.5-11
5.5	Статистики генеральных совокупностей и оценивание параметров	II.5-11
5.5.1	Методы вычисления параметров	II.5-11
5.5.2	Использование логарифмических преобразований	II.5-12
5.5.3	Историческая информация	II.5-13
5.5.4	Увеличение рядов наблюдений	II.5-13
5.5.5	Анализ смешанных совокупностей	II.5-13
5.5.6	Анализ повторяемости и нули	II.5-14
5.6	Графики распределения вероятностей и проверка по критерию согласия	II.5-15
5.6.1	Нанесение точек на график и распределение вероятностей	II.5-15
5.6.2	Проверка по критерию согласия	II.5-15
5.6.3	Информационный критерий	II.5-15
5.7	Анализ повторяемости дождевых осадков	II.5-16
5.7.1	Оценивание данных о дождевых осадках для целей анализа повторяемости	II.5-17
5.7.2	Анализ повторяемости дождевых осадков в отдельном пункте	II.5-18
5.7.3	Региональный анализ повторяемости дождевых осадков	II.5-19
5.7.4	Анализ повторяемости дождевых осадков, осредненных по площади	II.5-20
5.7.5	Анализ ливневых осадков для целей гидрологического проектирования	II.5-20
5.8	Анализ межennaleго стока	II.5-34
5.8.1	Общие положения	II.5-34
5.8.2	Анализ повторяемости низкого стока для отдельного поста	II.5-35
5.8.3	Оценивание повторяемости низкого стока на постах с частичной записью с помощью измерений базисного стока	II.5-37
5.8.4	Районирование статистических характеристик повторяемости низкого стока	II.5-38
5.8.5	Кривые продолжительности стояния стока	II.5-40
5.9	Анализ повторяемости паводковых стоков	II.5-41
5.9.1	Обобщение характеристик паводков по району	II.5-42
5.9.2	Уточнение контура однородных районов	II.5-43

		<i>Стр.</i>
5.9.3	Региональные методы оценивания паводков	II.5-44
5.9.4	Местный и региональный подход к анализу связи между продолжительностью и повторяемостью стока	II.5-46
5.9.5	Объединение данных отдельного поста и района	II.5-46
5.9.6	Анализ повторяемости паводков и изменчивость климата	II.5-47
5.10	Оценивание расчетных паводков	II.5-48
5.10.1	Общие положения	II.5-48
5.10.2	Расчетные паводки	II.5-49
5.10.3	Подготовка данных	II.5-52
5.10.4	Методы определения расчетного паводка	II.5-52
5.10.5	Концептуальные модели гидрографа паводков	II.5-56
5.10.6	Вклад снеготаяния в паводок	II.5-56
5.10.7	Расчет стока из городских дренажных систем	II.5-57
5.10.8	Риск	II.5-57
	Ссылки и дополнительная литература	II.5-58
ГЛАВА 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ		II.6-1
6.1	Математические детерминистические модели	II.6-1
6.1.1	Модели типа «черного ящика»	II.6-2
6.1.2	Искусственные нейронные сети	II.6-3
6.1.3	Концептуальные модели	II.6-4
6.1.4	Модели с распределенными параметрами	II.6-8
6.1.5	Оценивание параметров	II.6-11
6.1.6	Выбор моделей	II.6-12
6.2	Анализ временных рядов и пространственный анализ	II.6-13
6.2.1	Стохастическое моделирование гидрологических временных рядов ..	II.6-14
6.2.2	Обнаружение изменений в рядах гидрологических наблюдений	II.6-15
6.2.3	Пространственный анализ в гидрологии	II.6-19
6.3	Моделирование гидрологических систем и процессов	II.6-20
6.3.1	Введение	II.6-20
6.3.2	Взаимосвязи осадков и стока	II.6-20
6.3.3	Моделирование подземных вод	II.6-27
6.3.4	Модели снеготаяния	II.6-32
6.3.5	Трансформация руслового стока	II.6-41
6.3.6	Моделирование других процессов	II.6-45
6.4	Проблемы моделирования	II.6-51
6.4.1	Надежность и наличие входных данных	II.6-51
6.4.2	Неизученные водосборы	II.6-51
6.4.3	Стыковка моделей	II.6-52
	Ссылки и дополнительная литература	II.6-52
ГЛАВА 7. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ		II.7-1
7.1	Введение в гидрологические прогнозы	II-7-1
7.1.1	Предметный охват	II-7-1
7.1.2	Выпуск гидрологических прогнозов	II-7-1
7.1.3	Комплексные системы гидрологического прогнозирования	II-7-3
7.1.4	Неопределенность и вероятностные прогнозы	II-7-4
7.1.5	Распространение прогнозов и предупреждений	II-7-5
7.1.6	Средства поддержки принятия решений	II-7-7
7.1.7	Сотрудничество с национальной метеорологической службой	II-7-7
7.2	Требования к данным, используемым для гидрологических прогнозов	II-7-8
7.2.1	Общие положения	II-7-8
7.2.2	Данные, необходимые для создания прогностической системы	II-7-9
7.2.3	Данные, необходимые для оперативных целей	II-7-10

7.3	Методы прогнозирования	II-7-11
7.3.1	Требования к моделям для прогнозирования паводков	II-7-11
7.3.2	Методы прогнозирования паводков	II-7-12
7.3.3	Способы обновления моделей	II-7-16
7.3.4	Верификация прогнозов	II-7-17
7.4	Прогнозирование быстроразвивающихся бурных паводков	II-7-18
7.4.1	Национальные программы по прогнозированию быстроразвивающихся бурных паводков	II-7-18
7.4.2	Локальные системы прогнозирования быстроразвивающихся бурных паводков и предупреждений о них	II-7-19
7.4.3	Прогнозы быстроразвивающихся бурных паводков на больших территориях	II-7-21
7.4.4	Оценивание быстроразвивающихся бурных паводков	II-7-21
7.4.5	Прогнозирование быстроразвивающегося бурного паводка, вызванного разрушением плотины	II-7-24
7.4.6	Штормовые нагоны на реках	II-7-24
7.4.7	Паводки на урбанизированных территориях	II-7-24
7.4.8	Затопление городской территории, вызванное местным водосбором	II-7-25
7.5	Долгосрочное прогнозирование	II-7-26
7.5.1	Прогнозирование водоснабжения	II-7-26
7.5.2	Прогнозирование истощения стока	II-7-27
7.5.3	Анализ временных рядов	II-7-28
7.6	Прогнозы снеготаяния	II-7-28
7.6.1	Общие положения	II-7-28
7.6.2	Процессы формирования талого стока на равнинных и горных реках	II-7-28
7.6.3	Кратко- и среднесрочные прогнозы стока талого снега	II-7-29
7.6.4	Долгосрочные прогнозы снеготаяния	II-7-29
7.7	Прогнозы образования и вскрытия ледяного покрова	II-7-31
7.7.1	Общие положения	II-7-31
7.7.2	Долгосрочные ледовые прогнозы	II-7-31
7.7.3	Ледовые заторы и методы прогнозирования высоких уровней воды	II-7-31
	Ссылки и дополнительная литература	II-7-34

ПРЕДИСЛОВИЕ

В сентябре 2000 г. мировые лидеры приняли Декларацию тысячелетия Организации Объединенных Наций, в которой был сформулирован перечень из восьми оговоренных по срокам и поддающихся оценке целей и задач, направленных на борьбу с нищетой, голодом, заболеваниями, неграмотностью, деградацией окружающей среды и гендерным неравенством. Эти восемь целей известны как цели в области развития, сформулированные в Декларации тысячелетия (ЦРТ) Организации Объединенных Наций. Достижение каждой из этих целей в значительной мере зависит от наличия и доступности пригодной для потребления пресной воды, а также защиты населения от разрушительных последствий наводнений. Это, в свою очередь, возлагает большую ответственность на национальные гидрологические и гидрометеорологические службы, которые должны предпринимать все необходимые действия на национальном уровне в условиях постоянно возрастающего спроса на ограниченные ресурсы пресной воды в странах — членах ВМО. В трансграничных бассейнах, где, в частности, часто возникают проблемы, связанные с необходимостью справедливого распределения этих ограниченных ресурсов заинтересованные прибрежные страны должны создавать и поддерживать соответствующие механизмы для их распределения.

Одна из задач Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) заключается в содействии стандартизации метеорологических и гидрологических наблюдений и обеспечении единообразия при публикации данных наблюдений и результатов их статистической обработки. С этой целью Всемирный метеорологический конгресс традиционно принимает Технический регламент, в котором сформулированы метеорологическая и гидрологическая практики и правила, которых должны придерживаться страны — члены ВМО. Этот *Технический регламент* (ВМО-№ 49) дополнен рядом инструкций и руководств, в которых более подробно излагаются приемы и процедуры, предписанные или рекомендуемые к использованию странами-членами при мониторинге и оценке своих водных ресурсов. Таким образом, мы надеемся, что улучшенные единообразие и стандартизация в гидрологической практике и процедурах внесут вклад в укрепление сотрудничества между странами — членами ВМО и еще больше облегчат их взаимодействие на региональном и международном уровнях.

Цель *Руководства по гидрологической практике* состоит в предоставлении для всех экспертов, работающих в области гидрологии, соответствующей информации о существующих правилах, процедурах и оборудовании, необходимых для обеспечения их успешной деятельности. Полное изложение теоретических основ и всего

спектра применений гидрологических методов и оборудования выходит за рамки основных задач настоящего Руководства, однако в соответствующих случаях даются ссылки на необходимую литературу. Более детализированные процедуры мониторинга гидрологических параметров рассматриваются в специальных наставлениях ВМО.

Надеемся, что настоящее Руководство окажется полезным не только национальным службам стран-членов, но также различным заинтересованным сторонам и учреждениям, занимающимся как рациональным использованием водных ресурсов в целом, так и их мониторингом и оценкой в частности. В этой связи Комиссия по гидрологии ВМО (КГи) решила сделать настоящее Руководство «живым» документом, который будет размещен в Интернете и периодически обновляться. Данное Руководство станет элементом Структуры менеджмента качества ВМО — Гидрология, которая в настоящее время разрабатывается с целью оказания поддержки странам — членам ВМО и их национальным службам путем обеспечения безусловной эффективности и результативности осуществляемой ими деятельности, такой как получение гидрологических данных или предоставление обслуживания и продукции. Пользователям Руководства предлагается в связи с этим продолжать направлять свои замечания и предложения по его дальнейшему совершенствованию.

Руководство по гидрологической практике издается на английском, испанском, русском и французском языках. В то же время, как это было и в предыдущих случаях, некоторые страны — члены ВМО заявили о своем намерении перевести данное Руководство на свои национальные языки.

Я с большим удовольствием выражаю благодарность Комиссии по гидрологии ВМО, которая взяла на себя инициативу по осуществлению контроля над процессом пересмотра настоящего *Руководства по гидрологической практике*.



(М. Жарро)
Генеральный секретарь

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

В соответствии с заявленными потребностями своих членов Комиссия по гидрологии ВМО решила обновить и опубликовать данное шестое издание *Руководства по гидрологической практике* (далее — *Руководство*). Это решение было принято на основании комментариев и опыта использования пятого издания *Руководства* и признания его значительной ценности для национальных гидрологических служб и специалистов, работающих в области гидрологии. Более 40 опытных экспертов со всего мира внесли вклад в подготовку данного издания *Руководства*. В результате оно ориентировано на практическое применение и укладывается в структуру менеджмента качества, которая была предложена Комиссией по гидрологии. Я с большим удовольствием выражаю благодарность от имени Комиссии всем тем экспертам, которые выразили желание принять участие в сборе материалов и процессе его подготовки и способствовали выполнению этой непростой задачи.

Также я выражаю свою глубокую признательность членам редакционного комитета, учрежденного Комиссией по гидрологии, которая осуществляла контроль над процессом пересмотра *Руководства*. Редакционный комитет, возглавляемый Карлом Хофиусом (Германия), в составе Суреша Чандры (Индия), Дениса Хагеса (ЮАР), Фреда Киосингира (Уганда), Поля Пилона (Канада), Марко Поло Риверо (Венесуэла) и Авинаша Тьяги (директора Департамента климата и воды Всемирной Метеорологической Организации (ВМО)), выполнил большую работу по выявлению тех разделов пятого издания *Руководства*, которые нуждались в пересмотре и обновлении; по определению экспертов, ответственных за компоновку и независимое рассмотрение различных глав и разделов *Руководства*, а также по рецензированию поступивших от экспертов материалов.

Я выражаю искреннюю благодарность и признательность всем экспертам, которые внесли вклад в подготовку и рецензирование нового издания *Руководства*. Над обновлением и редактированием глав (указаны в скобках) тома I *Руководства* работали следующие специалисты: Свейн Харстен (главы 2 и 5), Роберт Халидей (глава 2), Крис Колльер (глава 3), Каран С. Бхатия (глава 4), Ахмед Фахми (глава 5), Антони Навой (глава 6), Энн Кудрен (глава 7), Альберт Ругумайо (глава 8), Джон Фенвич (глава 9), а также Мэтью Фри и Фрэнк Фаркухарсон (глава 10).

Экспертный обзор подготовленных материалов для различных глав выполнили Роберт Халидей (глава 2), Николас Кувен (глава 3), Мауро Греппи (глава 4), Свейн Харстен (глава 5), Джиованни Мариа Цуппи (глава 6), Валерио Вендегна (глава 7), Филиппо Тьерри и Фабио Сантамария (глава 8), Мария-Моника Гиока (глава 9), а также Брюс Стюарт (глава 10).

Следующие эксперты внесли вклад в пересмотр различных глав и разделов тома II *Руководства* (указаны в скобках): Арни Сноррассон (глава 2), Поль Мосли (материалы из главы 2), Брюс Митчелл (глава 3), Тинус Бассон (раздел 4.2), Суреш Чандра (раздел 4.3), П. Б. С. Сарма (раздел 4.4), Вальдемар Андраде (раздел 4.5), Денис Моснье (раздел 4.5), Бенно Дроге (раздел 4.6), Карлос Туччи (раздел 4.7), Шанкар Б.Кулкарни (раздел 4.8), Карлос Мейер (раздел 4.9), Каз Адамовски (глава 5), Збигнев В.Кунджевич (глава 6), а также Курт Баррет, Коста Георгакакос, Ян Клюки, Поль Пилон, Сергей Борщ и Джеймс Дент (глава 7). Вклад в виде материалов по последним научно-техническим достижениям в области дистанционного зондирования был внесен Эдвином Энгманом и Ахаламом Шалаби (различные главы).

Экспертный обзор материала тома II выполнили следующие эксперты: Поль Пилон (глава 3), Ричард Мюллер (раздел 4.2), Поннусварни Соориякумаран (раздел 4.3), Марио Фугацца (раздел 4.4), Вальдемар Андраде и Денис Моснье (раздел 4.5), Хуссам Фахми и Маха Тавфик (раздел 4.6), Джим Эллиот (раздел 4.7), Кристоф Ансей (раздел 4.8), Денис Хугес (раздел 4.9), Мануэль Иригойен и Эзио Тодини (глава 5), Паоло Миньоса (глава 6), Илмар Карро и Лильяс Эрик (глава 7). Джакомо Теругги, Джон Бассиер и Артур Аскью оказали большую и существенную поддержку в процессе подготовки настоящего *Руководства* посредством обеспечения координации работы авторов и улучшения необходимого технического редактирования материалов. И что самое главное, публикация не стала бы возможной без активной поддержки персонала Секретариата ВМО.

Шестое издание *Руководства* станет живым документом, и его Интернет-версия будет обновляться по мере того, как будут появляться значительные практические достижения в различных областях. Поскольку *Руководство* применяется и используется на практике, оно может быть улучшено благодаря комментариям и предложениям гидрологического сообщества. Комиссия по гидрологии постарается поддерживать *Руководство* на уровне современных требований, принимая во внимание отзывы и комментарии своих членов.



(Брюс Стюарт)
Президент Комиссии по гидрологии

ГЛАВА 1

ВВЕДЕНИЕ

1.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Гидрология представляет собой науку, изучающую формирование и распространение вод на Земле во времени и пространстве как над земной поверхностью, так и под ней, включая их химические, биологические и физические свойства, и их взаимодействие с окружающей средой (ВМО/ЮНЕСКО, 1992). Она дает представление о различных фазах воды, наблюдаемых при поступлении воды на поверхность Земли из атмосферы и возвращении обратно в атмосферу. Основы гидрологии используются для оценки и управления водными ресурсами, при решении практических проблем, связанных с наводнениями и засухами, эрозией почвогрунтов, переносом наносов, а также с загрязнением вод. Постоянно возрастающее давление на имеющиеся водные ресурсы, осуществляемое в целях улучшения экономического благосостояния, и проблемы загрязнения поверхностных и подземных вод выдвинули гидрологию на первое место при решении многих задач, связанных с водой и окружающей средой.

Для обеспечения руководства по мониторингу этого жизненно важного ресурса, который занимает центральное место в развитии и благосостоянии человечества, Комиссия по гидрологии Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) на своей первой сессии (Вашингтон, округ Колумбия, 1961 г.) признала насущной необходимость подготовки руководства по основным гидрологическим методам. В результате в 1965 г. было опубликовано первое издание *Руководства по гидрометеорологической практике*.

Второе и третье издания Руководства были опубликованы в 1970 и 1974 г. соответственно. Третье издание носило название *Руководство по гидрологической практике*, отражая тем самым более широкие границы его содержания. Впоследствии, на своей пятой сессии (Оттава, 1976 г.), Комиссия одобрила пересмотр и существенные дополнения к Руководству, четвертое издание которого было выпущено в двух томах. В томе I рассматривались вопросы, связанные со сбором и обработкой данных, а в томе II — анализ, прогнозирование и другие прикладные аспекты. Тома I и II четвертого издания были опубликованы в 1981 и 1983 г. соответственно. По мере развития технологий и деятельности ВМО в области гидрологии и водных ресурсов в 1994 г. было опубликовано пятое издание Руководства в виде одного объединенного тома. Кроме того, оно было издано на компакт-диске

для свободного распространения в более широких кругах специалистов в области управления водными ресурсами, не входящих в традиционную для ВМО аудиторию.

В 1999 г. Всемирный метеорологический конгресс принял подзаголовок «Погода, климат и вода» в качестве официального девиза Организации. В следующем году Комиссия по гидрологии на своей одиннадцатой сессии в Абудже (Нигерия) рекомендовала, чтобы шестое издание Руководства было опубликовано в виде «живого» документа в сети Интернет и обновлялось как можно чаще по мере необходимости.

1.2 ПРЕДМЕТ РУКОВОДСТВА

Принятые принципы интегрированного управления водными ресурсами предписывают, что для достижения экологической устойчивости и экономической эффективности управление реками должно осуществляться на уровне бассейна. В наше время, когда все, что связано с водой, привлекает всеобщее внимание, различные заинтересованные стороны как на национальном, так и на международном уровнях, участвуют и играют важную роль в управлении водными ресурсами. Многие учреждения и организации на национальном уровне заняты сбором гидрологических данных и информации. Эти данные собираются различными агентствами, использующими разные методы измерения. Появляющаяся в результате неоднородность наблюдений приводит к снижению уверенности в качестве имеющихся данных. Поэтому крайне важно, чтобы все участники этой деятельности были знакомы с методами сбора гидрологических данных, существующими ограничениями и надежностью данных, и с тем, как они используются ответственными организациями в масштабе бассейна. Прозрачность процедур сбора, хранения и совместного использования данных — существенно важный элемент сотрудничества различных пользователей. Структура менеджмента качества для гидрометрии и гидрологической информации является основой использования гидрологической информации из различных источников.

Растущий спрос на пресную воду привлек внимание правительств и гражданского общества к важности совместного управления имеющимися ресурсами. Совместное использование преимуществ такого

сотрудничества и даже предотвращение конфликтов базируются на всестороннем понимании принципов и механизмов достижения этих результатов. Трансграничные реки имеют определенный потенциал экономического или политического объединения соседних стран, или, наоборот, могут стать причиной экономической и политической напряженности. Фактор риска в принятии решений в области управления водными ресурсами является функцией гидрологической изменчивости. Риски могут быть уменьшены при совместном управлении трансграничными реками. По большому счету, сотрудничество в трансграничном речном управлении является политической деятельностью. Распределение ресурсов или выгод от их использования, в основном, зависит от осведомленности об объемах имеющихся водных ресурсов и связанной с ними гидрологической изменчивости. Общедоступность и распространение данных о водных ресурсах, их прогнозируемое наличие и уверенность в точности прогнозов существенно помогают при оценке выполнимости и объективности выбора вариантов управления и инвестиционных сценариев.

Недостаточная однородность данных наземной составляющей гидрологического цикла ограничивает возможности науки в отслеживании изменений, связанных с климатом, и определении причин изменчивости и изменений гидрологического режима. Речной сток играет роль определяющего фактора климатической системы, поскольку выпадающие в Мировой океан пресноводные потоки могут влиять на термохалинную циркуляцию. Для того чтобы использование данных было простым и надежным, их качество, а также методы их получения, хранения и обмена должны соответствовать установленным стандартам и протоколам.

Все эти факторы увеличили потребность в проверке качества гидрологических данных. Стремясь обеспечить экспертную поддержку международного сотрудничества в области погоды, климата, гидрологических процессов и водных ресурсов, ВМО регулярно издает международные руководящие документы и стандарты. Можно надеяться, что настоящее Руководство станет важным элементом в Структуре менеджмента качества ВМО в отношении гидрологических методов. В целях соответствия всем этим требованиям проводится непрерывная работа по расширению содержания и обновлению Руководства, ныне выходящего в свет в шестом издании. Ожидается, что Руководство будет полезно не только национальным гидрологическим службам, но и другим заинтересованным сторонам.

В настоящем Руководстве рассматриваются все аспекты наземной фазы гидрологического цикла, причем особое внимание уделено его поверхностным

и подземным составляющим. Наряду с другими руководствами и наставлениями, изданными ВМО, в нем представлена подробная информация о тех аспектах гидрологии и водных ресурсах, которые входят в сферу деятельности Организации, призванной помогать в этих направлениях национальным гидрологическим службам и другим организациям, имеющим сходные цели.

Настоящее Руководство является составной частью общей совокупности рекомендуемых видов практики и процедур, предусмотренных *Техническим регламентом* (ВМО-№ 49), том III — Гидрология, утвержденным ВМО. Странам — членам ВМО предлагается придерживаться рекомендуемых практик и процедур при организации своих гидрологических служб, а также в их деятельности.

1.3 СОДЕРЖАНИЕ РУКОВОДСТВА

Сложно провести четкую границу между гидрологией как наукой и практическим планированием и рациональным использованием водных ресурсов. Тем не менее, по практическим причинам было необходимо разделить это издание Руководства на два тома, как показано на рисунке II.1.1.

В томе I, озаглавленном «Гидрология — от измерений до гидрологической информации», рассматриваются сети, приборы, методы наблюдений, первичная обработка данных и их хранение. Он содержит 10 глав, начиная с введения и описания содержания в главе 1.

В главе 2, озаглавленной «Методы наблюдений», рассматриваются вопросы проектирования и оценки эффективности сетей гидрологических наблюдений, и приводится обзор приборов и методов наблюдений различных элементов гидрологического режима, которые подробно описаны в следующих главах. Измерение осадков отражено в главе 3 во всех его аспектах, начиная с местоположения осадкомеров, и заканчивая наблюдениями за осадками с помощью дистанционного зондирования. В данной главе речь идет о жидких и твердых осадках, включая их качество. В главе 4, «Испарение, суммарное испарение и влажность почвы», рассматриваются прямые и косвенные методы, а также дается краткий обзор методов уменьшения испарения.

Глава 5, «Количество поверхностных вод и измерение наносов», является основной. В ней рассматриваются измерение стока реки и емкости озер и водохранилищ. Там также говорится об измерении твердого стока. Этот вопрос более подробно обсуждается в *Manual on Stream Gauging* (Наставление по измерению расхода воды) (WMO-No. 519) и *Manual on Operational Methods*

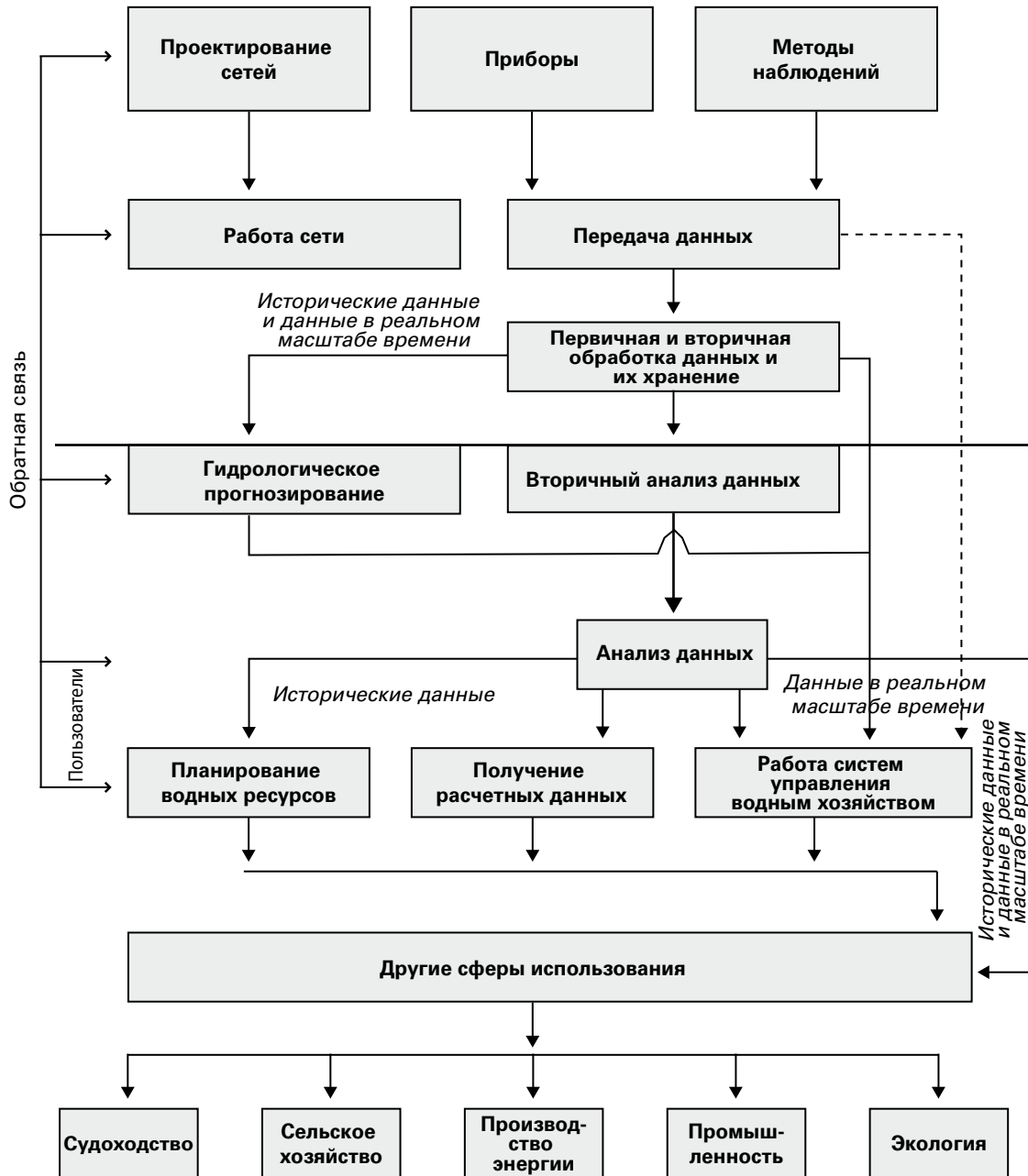


Рисунок II.1.1. Гидрологическая система

for the Measurement of Sediment Transport (Наставление по оперативным методам измерения твердого стока) (WMO-№. 686), к которым читателю предлагается обратиться за дополнительной информацией.

В главе 6, которая озаглавлена «Подземные воды», рассматриваются вопросы, связанные с измерением уровня воды в колодцах и гидравлические свойства водоносных горизонтов. В ней также подробно представлены различные дистанционные методы наблюдений за грунтовыми водами.

Развитие водных ресурсов ограничивается не только их наличием, но и качеством. Соответственно в главе 7 «Качество воды и водные экосистемы» рассматривается ряд вопросов, начиная от методов отбора проб до дистанционного зондирования. В главе 8 «Условия соблюдения техники безопасности в гидрометрии» затрагивается весь спектр тем, начиная от безопасности персонала, проводящего наблюдения, и заканчивая мерами безопасности на гидрометрических станциях с самописцами и защитой собранных проб.

И, наконец, глава 9, «Обработка данных и контроль качества», и глава 10, «Хранение, доступ и распространение данных», повествуют о распространении данных для их использования специалистами, занимающимися водными проблемами.

В томе II рассматривается применение информации, о которой говорилось выше, в гидрологическом прогнозировании, планировании и подготовке различных водных проектов. Соответственно, том называется «Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов». Он состоит из семи глав, начиная с введения и краткого описания содержания в главе 1.

Глава 2 дает представление об управлении гидрологическими службами, включая кадровые аспекты и управление финансами и активами. В главе 3 рассматривается интегрированное управление водными ресурсами и подчеркивается важная роль качественных гидрологических данных при комплексном решении различных вопросов управления водными ресурсами. В главе 4 освещены проблемы использования гидрологической информации в применении к управлению водным хозяйством, а именно при оценке ёмкости водохранилищ и водосброса, управлении наводнениями, орошении и осушении, в гидроэнергетических и других энергетических проектах, в судоходстве и регулировании речного русла, в управлении водными ресурсами на урбанизированных территориях, в задачах, связанных с переносом наносов и морфологией русел рек, а также проблемах окружающей среды. В главе 5 рассматриваются методы анализа экстремальных значений, а главы 6 и 7 посвящены, соответственно, моделированию гидрологических систем и гидрологическим прогнозам — двум ключевым функциям гидрологических служб в сфере управления водным хозяйством.

В то время как определенный уровень стандартизации в отношении приборов, методов наблюдений и публикации данных ожидается и может уже быть достигнут, дело с методами гидрологического анализа и другими приложениями обстоит значительно хуже. Поэтому в томе II сделан акцент на описании альтернативных подходов к решению различных задач, целесообразность и практичность которых проверена на практике. Следует обратить внимание на то, что задачей данного Руководства является скорее не рекомендация какого-либо предпочтительного метода, а рассмотрение основных свойств и достоинств каждого из подходов. Окончательный выбор метода зависит от большого числа факторов, включая особенности гидрологического и метеорологического режимов, наличие исходных данных и информации, поставленные задачи, и может быть сделан только при ясном представлении конкретной ситуации. Всевозрастающее распространение в

последние годы персональных компьютеров позволило ввести более точные методы анализа сложных гидрологических проблем. Некоторые из этих методов уже получили широкое применение на практике, они также включены в настоящее Руководство.

Ограничения по объему настоящего Руководства не позволяют осветить все проблемы в полном объеме. Для получения более подробной информации по перечисленным вопросам читателю следует обратиться к следующим публикациям: по измерению расхода воды — *Manual on Stream Gauging* (Наставление по измерению расхода воды) (WMO-No. 519), тома I и II, а по методике отбора проб — к *GEMS/Water Operational Guide* (Оперативное руководство по ГСМОС/Воде) (UNEP, 2005). Читателю рекомендуется также ознакомиться с международными стандартами, касающимися методов измерения стока в открытых руслах, которые подготовлены странами — членами Международной организации по стандартизации (ИСО). В ИСО разработано свыше 50 стандартов для различных типов и методов измерений. Полезные сведения также можно найти в трудах международных научных симпозиумов по вопросам гидрометрии, организуемых Международной ассоциацией гидрологических наук (МАГН), ВМО и Организацией Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО).

Полное описание теоретических основ рекомендуемых видов практики и детальное обсуждение способов их применения выходит за рамки данного Руководства. По этим вопросам читатель найдет в тексте ссылки на соответствующие наставления и технические отчеты ВМО, а также на другие пособия, справочные и технические наставления национальных агентств. В частности, более подробное руководство по приборам и методам наблюдений содержится в *Руководстве по метеорологическим приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 8) и в *Руководстве по климатологической практике* (ВМО-№ 100).

Списки литературы приводятся в конце каждой главы.

1.4 ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ОПЕРАТИВНАЯ МНОГОЦЕЛЕВАЯ СИСТЕМА

В последние десятилетия в гидрологической науке и технике достигнут существенный прогресс; большой вклад в освоение и рациональное использование водных ресурсов был также сделан гидрологами, работающими в полевых условиях. Для того чтобы способствовать распространению гидрологических методов среди национальных гидрологических служб,

ВМО разработала систему передачи технологий под названием Гидрологическая оперативная многоцелевая система (ГОМС). Эта система действует с 1981 г. и предполагает простой, но эффективный способ широкого распространения испытанных методов для использования их гидрологами. В системе ГОМС гидрологические технологии передаются в виде отдельных компонентов. Эти компоненты могут принимать различную форму, например: наборы чертежей (или пособия с инструкциями) для конструирования гидрологических приборов, отчеты с описаниями разнообразных гидрологических процедур и компьютерные программы, производящие первичный контроль качества гидрологических данных, их обработку и хранение, а также моделирование и анализ обработанных данных. На сегодняшний день ГОМС включает свыше 180 компонентов, которые оперативно используются их создателями. Такой путь обеспечивает уверенность в том, что каждый компонент служит своей цели и проверен на практике. Описания этих компонентов приведены в *Справочном наставлении по ГОМС*, которое доступно на сайте http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/homs/homs_ru.html на английском, испанском, русском и французском языках. Настоящее Руководство в дальнейшем будет дополняться путем приведения перекрестных ссылок на соответствующие компоненты ГОМС, которые находятся в начале соответствующего раздела этого Руководства.

Список и дополнительная литература

- Всемирная Метеорологическая Организация, 1983: *Руководство по климатологической практике*. Второе издание, ВМО-№ 100, Женева.
- , 1994: *Руководство по гидрологической практике*. Пятое издание, ВМО-№ 168, Женева.
- , 1996: *Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений*. Шестое издание, ВМО-№ 8, Женева.
- , 2006: *Технический регламент*, том III — Гидрология. ВМО-№ 49, Женева.
- и Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры, 1992: *Международный гидрологический словарь*. ВМО-№ 385, Женева.
- World Meteorological Organization, 1980: *Manual on Stream Gauging*. Volumes I and II, Operational Hydrology Report No. 13, WMO-No. 519, Geneva.
- , 1989: *Manual on Operational Methods for the Measurement of Sediment Transport*. Operational Hydrology Report No. 29, WMO-No. 686, Geneva.
- , 2000: *Hydrological Operational Multipurpose System (HOMS) Reference Manual*. Second edition, Geneva.
- United Nations Environment Programme Global Environment Monitoring System (GEMS)/Water Programme, 2005: *Global Environment Monitoring System (GEMS)/Water Operational Guide*. Fourth edition, Inland Waters Directorate, Burlington, Ontario.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ СЛУЖБЫ

2.1 ВВЕДЕНИЕ

Большинство гидрологических служб работает в государственном секторе и, следовательно, находится под влиянием тенденций в государственной политике и практике. Более того, они работают в быстро изменяющихся внешних условиях, характеризующихся следующими факторами:

- a) повышение всемирной ответственности за устойчивое управление природными ресурсами и охрану окружающей среды в сочетании с деятельностью по улучшению условий жизни малоимущих слоев населения, которое в целом в большой степени зависит от природных ресурсов;
- b) необходимость уделять больше внимания комплексному управлению водными ресурсами, поскольку интенсивная эксплуатация водных и других природных ресурсов Земли приводит к всеобщему пониманию того, что эти ресурсы должны осваиваться и регулироваться экологически рациональным образом;
- c) кажущееся неотвратимым увеличение последствий, вызываемых стихийными бедствиями, особенно наводнениями и засухами. В то же время учет факторов риска получает все более широкое распространение;
- d) увеличение капиталовложений гидрологических служб в капитальные фонды и переподготовку персонала, что является вкладом в предоставление новых или улучшенных видов продукции;
- e) возрастание ожиданий, что государственные службы должны быть подотчетны не только назначенным представителям, но также и обществу в целом. Государственные службы должны осуществлять свою деятельность с рентабельностью, эффективностью и выгодой. Эти ожидания могут достигнуть кульминации при угрозе судебного разбирательства, когда государственные учреждения не оправдывают ожиданий широкой общественности;
- f) сильная конкуренция за ресурсы в государственном секторе, поскольку органы государственного управления и власти стремятся уменьшить налогообложение в соответствии с возрастающими ожиданиями общества;
- g) растущее воздействие глобализации, которое затрагивает гидрологические службы как непосредственным, так и косвенным образом;
- h) воздействие социально-экономических тенденций на повседневную работу гидрологических служб,

таких как вовлечение женщин в профессиональную деятельность и постоянно растущее использование Интернета или представление на основе Интернета гидрологических данных и продукции.

Эффективное управление ресурсами требует точной информации как основы для планирования, освоения и мониторинга ресурсов. Однако для реализации в полной мере комплексного управления водными ресурсами требуется широкий диапазон гидрологической и сопутствующей информации, которая, возможно, не легко доступна. Для того чтобы получить такую информацию, национальной гидрологической службе требуется корректное организационное развитие с целью решения этих новых задач и разработки соответствующих возможностей и/или налаживания деловых связей или стратегических союзов с взаимодействующими учреждениями.

Широкой общественности постоянно требуется гидрологическая информация и продукция более высокого качества. Такая высококачественная продукция и процессы могут обеспечить конкурентные преимущества для гидрологических служб, которым необходимо конкурировать на рынке. Кроме того, необходимо соблюдать поддающиеся проверке нормативные требования, что, как правило, позволяет гидрологической службе сделать менеджмент качества ключевым моментом своей деятельности, а ее директору необходимо принимать на себя окончательную ответственность за качество гидрологической продукции.

Государственным учреждениям постоянно приходится выполнять больше работы с наименьшими затратами, и зачастую они вынуждены покрывать определенные эксплуатационные издержки и искать коммерчески выгодные проекты с тем, чтобы уменьшить бремя налогоплательщика

Таким образом, директор гидрологической службы должен постоянно следить за изменениями во внешних условиях деятельности, чтобы обеспечивать принятие соответствующих мер реагирования.

2.2 ОБЯЗАННОСТИ И ФУНКЦИИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СЛУЖБ [ГОМС А00]

2.2.1 **Характер продукции и обслуживания гидрологической службы**

Гидрологические данные и информация являются, по большому счету, общественными товарами ограниченного доступа, поскольку для поставки данных дополнительному клиенту фактически не требуется дополнительных затрат, при этом доступом к информации можно управлять. Следовательно, гидрологическая служба может выбирать — разрешить свободный доступ к некоторому количеству информации, например, размещая ее в Интернете, что неизменно передает ее в общественное пользование, или ограничить доступ к другой информации, например, передавая ее только выборочным пользователям при строгих договорных условиях относительно последующей передачи. В этом смысле такие услуги как выпуск предупреждений для населения — это чисто общественные товары.

Национальная гидрологическая служба может предоставлять гидрологические данные и информацию на государственном уровне рентабельным способом. Это означает, что:

- a) продукция или общественные услуги, такие как предупреждения, выпускаемые для населения, могут быть обеспечены только благодаря использованию государственного финансирования, поскольку гидрологическая служба не может свободно возмещать свои издержки за счет выгодоприобретателей;
- b) чтобы получить или обеспечить финансирование из правительственных источников для обеспечения как общедоступных, так и ограниченных по доступу товаров и услуг, предоставляемых для общественного потребления, необходимо демонстрировать обществу их ценность или достоинства;
- c) продукция или обслуживание, которые являются общественными товарами ограниченного доступа, могут быть предоставлены на основе доходности или возмещения затрат за счет выгодоприобретателей. Для осуществления этих мер могут потребоваться действия органов управления. Предполагается наличие надлежащих методов учета, финансовой прозрачности и честного расходования имеющихся средств;
- d) границы между управлением общедоступными товарами и общественными товарами ограниченного доступа могут изменяться в результате, например, развития технологий, договорных соглашений и общественной информации. Гидрологическая служба обладает возможностями влиять на такие границы, если это входит в национальные интересы;
- e) при лоббировании источников финансирования руководители должны пересмотреть предоставляемые

ими продукцию и обслуживание с тем, чтобы гарантировать, что они соответствуют мандату и структуре затрат национальной гидрологической службы.

2.2.2 **Пользователи гидрологической продукции и обслуживания**

Кто является клиентами гидрологической службы? В основном для национальной гидрологической службы конечным потребителем является основная часть населения, представленная назначенными должностными лицами на государственном, областном/районном и местном уровнях, включая будущие поколения, которые извлекают выгоду из гидрологической работы, выполняемой сегодня.

Правительственная политика и цели в области национального развития, а также информация, необходимая для их поддержки, существенным образом влияют на гидрологическую службу. Так, во многих развивающихся странах в начале двадцать первого века отмечался рост борьбы с нищетой на национальном уровне. Руководители гидрологической службы должны следить за правительственной политикой и анализировать значения этой политики для отдельно взятой гидрологической службы. Какие виды продукции и обслуживания гидрологической службе необходимо будет предоставлять для поддержки национальной политики и целей? Способствуют ли этому предоставляемые гидрологической службой в настоящее время виды продукции и обслуживания? Другими словами, руководители должны гарантировать, что продукция и обслуживание, предоставляемые гидрологической службой, приносят максимально возможную пользу. Помимо всего прочего, это лучше всего оценивать объективно при помощи категорий «затраты-выгоды», анализа рентабельности и проблем нищеты. Общественные интересы могут изменяться, и поэтому, в дополнение к традиционным, гидрологическая служба может иметь и других разнообразных пользователей. Гидрологическая служба может также предложить частные услуги пользователям, которые готовы заплатить за них. Круг таких пользователей меняется от страны к стране в зависимости от характера национальной экономики.

Руководство отдельной гидрологической службы должно проводить частые опросы с целью выявления потенциальных пользователей. Оно должно непрерывно отслеживать тенденции в потребностях в водных ресурсах, национальной, региональной политике и целях в области развития, в политических заявлениях, а также тренды и развитие событий в различных экономических секторах, как и международные соглашения и соглашения с финансирующими организациями и другими партнерами по развитию.

Ожидания пользователей из разных сфер деятельности, включая государственный сектор, непрерывно повышаются, поэтому необходимо всегда стремиться соответствовать этим ожиданиям или превзойти их. Гидрологические службы не являются исключением. Чтобы обеспечить будущее гидрологической службы, руководители должны поощрять среди своих сотрудников ориентированность на пользователя. Особый и самый важный пользователь — это лицо, которому директор подотчетен, например министр окружающей среды. Будущее гидрологической службы зависит от того, насколько успешно директор представляет гидрологическую службу этому лицу и демонстрирует, как гидрологическая служба может быть полезна для пользователя.

Маркетинговая стратегия должна преследовать следующие цели:

- a) выявлять существующих и потенциальных пользователей гидрологической службы, поддерживать и обновлять базу данных пользователей;
- b) определять виды продукции и обслуживания, необходимые пользователям, которые может предоставлять гидрологическая служба;
- c) определять самый подходящий способ или место предоставления продукции или обслуживания для пользователя, например использование сети Интернет для предоставления доступа к данным в реальном масштабе времени, отправки предупреждений по факсимильной связи или обычных письменных отчетов с приложениями данных на компакт-диске;
- d) определять политику ценообразования как для различных видов продукции и обслуживания, так и для различных пользователей;
- e) определять категории лиц, вовлеченных в предоставление продукции или обслуживания;
- f) определять процедуры предоставления продукции или обслуживания согласно потребностям пользователей;
- g) продвигать гидрологические услуги там, где потенциальные пользователи могут быть ясно определены, и непосредственно контактировать с ними.

2.2.3 Поддержание деловых отношений с клиентами

Ключевым элементом управления любой хозяйственно-экономической деятельности является поддержание деловых отношений с клиентами. Надежная коммуникация с клиентами имеет важнейшее значение для получения уверенности в том, что они оповещены о возможностях гидрологической службы. Хорошие связи с общественностью и откровенная обратная связь необходимы для удовлетворения клиента. Поскольку представители широкой общественности составляют большую часть пользователей гидрологического

обслуживания государственного сектора, важно, чтобы общественность была информирована относительно деятельности и выходной продукции гидрологической службы, и существовала бы возможность обратной связи. Гидрологическая служба должна иметь высокий авторитет, то есть быть заметной, и обеспечивать информированность широкой публики о ее работе. Всемирный день воды, который отмечается 22 марта каждого года, предоставляет такую возможность.

2.2.4 Гидрологическая продукция и обслуживание

Основная продукция гидрологической службы — связанные с водой данные и информация. Данные и информация имеют большое значение для принятия решений. Следовательно, гидрологическое обслуживание может рассматриваться как способствующее росту доверия или уменьшению риска для своих пользователей в ходе принятия ими связанных с водой решений. Фактически одним из показателей ценности этих данных и информации является их воздействие на принимаемые решения.

Существует определенный континуум видов продукции, которые может предоставлять гидрологическая служба:

- a) связанные с водой данные и наблюдения, полученные с сети наблюдений. Системы управления базами гидрологических данных предоставляют основные статистические данные, такие как ежедневные, ежемесячные, сезонные и ежегодные средние или максимальные значения, которые полезны для пользователей;
- b) связанная с водой информация, например всесторонняя оценка государственных водных ресурсов, статистические данные о паводковых явлениях или карты пространственных/временных трендов качества грунтовых вод;
- c) служба мониторинга, предназначенная для предоставления очень специализированных данных или информации в конкретном месте для отдельного пользователя, например, чтобы указать, когда концентрация растворенного кислорода вниз по течению от места водосброса станет ниже определенного минимального значения;
- d) знание и понимание связанных с водой явлений и водных ресурсов;
- e) консультирование по вопросам принятия решений, при которой информация приводится в форме рекомендаций для реагирования на определенные условия, например рекомендация относительно надлежащего реагирования на разлив загрязняющих веществ на основном русле или по вопросам реагирования на развивающуюся засуху.

Руководству гидрологической службы необходимо стремиться разрабатывать виды продукции и обслуживания с добавленной стоимостью, и выбираться из «ловушки данных» — ситуации, при которой гидрологическая служба всего лишь предоставляет данные, из которых другие лица извлекают выгоду. Необходимо наращивание потенциала в плане квалификации персонала, управления информационными технологиями, обеспечения качества и маркетинга. Также, вероятно, придется произвести другие изменения в организационных механизмах, например разрешить гидрологической службе сохранять доход, который она получает. Продукция и обслуживание, предлагаемые гидрологической службой, имеют ценность и поэтому являются экономическим товаром. Сотрудники гидрологической службы должны учиться оформлять свою продукцию так, чтобы соответствовать нуждам пользователей. Они должны также понимать, что потребности пользователей меняются в зависимости от изменения климатических и экономических условий.

2.2.5 **Функции и виды деятельности гидрологической службы**

Функции гидрологической службы должны отражать виды продукции и обслуживания, требуемые пользователем. В *Техническом регламенте* (ВМО-№ 49), том III — Гидрология, D.1.1, 8.3, описываются основные функции гидрологической службы. Они включают следующие виды деятельности: разработка стандартов и программ обеспечения качества; проектирование и эксплуатация сетей наблюдений; сбор, обработка и хранение данных; оценка потребностей пользователей в данных и информации, относящихся к воде; а также предоставление таких данных и информации пользователю, например гидрологических прогнозов и оценок водных ресурсов.

Гидрологи сегодня нуждаются в намного более широком взгляде на гидрологию, включая экологический, биологический и антропогенный аспекты использования водной системы. Соответственно, виды деятельности многих гидрологических служб становятся все более и более разнообразными, поскольку они имеют дело с различными типами данных и информации. Гидрологическим службам необходимо непрерывно следить за изменениями в запросах на связанные с водой данные, информацию и рекомендации для того, чтобы они могли распределять ресурсы соответствующим образом. Чем раньше начнется этот процесс, тем лучше, поскольку базовые измерения и информация о трендах потребуются для многих целей в будущем.

Особые национальные условия могут потребовать выполнения дополнительных основных видов

деятельности, таких как контроль эрозии речного русла и меандрирования или заиление водохранилищ.

Функции и виды деятельности гидрологической службы не привязаны к какому-либо времени, а изменяются как отклик на развивающиеся потребности и ожидания общества и в соответствии с техническим прогрессом. Руководству гидрологической службы необходимо все время следить за изменениями в окружающей ее деловой среде и оценивать их значение для гидрологической службы. Например, в последние годы деятельность некоторых гидрологических служб значительно изменилась под влиянием следующие обстоятельств:

- a) признание гидрологической значимости изменения климата привлекает особое внимание к мониторингу засух, прогнозированию экстремальных явлений и анализу временных рядов;
- b) практически повсеместное принятие систем управления компьютерными базами данных приводит к опубликованию гидрологических ежегодников и распространению гидрологических данных и продукции в электронной форме;
- c) соглашения о сотрудничестве между береговыми государствами в трансграничных речных бассейнах;
- d) принятие региональных политических соглашений с последующими изменениями и адаптацией стандартов, инструкций и директив, которые участвующие страны должны соблюдать, например, European Union Water Framework Directive (Рамочная директива Европейского Союза по воде) 2000/60/ЕС (ЕС, 2000) внесла значительные изменения в гидрологическое обслуживание как в Европейском Союзе, так и в потенциальных государствах-участниках.

В прошлом фундаментальная деятельность гидрологической службы состояла в проектировании и эксплуатации основной сети наблюдательных станций. Это позволило получить национальную оценку водных ресурсов страны, обеспечивая, таким образом, основной набор данных для удовлетворения будущих потребностей в данных во всех местах и для широкого круга задач. Это также привлекло новые технические ресурсы, необходимые для получения оценок водных ресурсов в пунктах, для которых не было вообще никаких полевых данных.

Во многих странах становится все труднее поддерживать концепцию основной государственной сети. В некоторых странах продвижение идеи интегрированного управления водными ресурсами на основе речных бассейнов, которая сама по себе является превосходной концепцией, позволило сосредоточить усилия по мониторингу на конкретных применениях данных за счет национального охвата. Поэтому важно

демонстрировать преимущества комплексной интегрированной гидрологической службы, в которой широкомасштабный сбор исходных данных является более экономичным как с точки зрения функционирования сетей мониторинга и управления данными, так и для оценки водных ресурсов.

Гидрологическая служба может также заниматься предоставлением частного обслуживания. В этой связи можно привести следующие примеры:

- a) обязательный мониторинг качества поступающей воды ниже места сброса сточных вод производства;
- b) мониторинг притока в водохранилище и водосброса в нижний бьеф плотины электростанции для гидроэнергетической компании;
- c) связанные с водой данные, требующиеся для оценки экологического воздействия для частного использования;
- d) предоставление информации для частной ирригационной компании;
- e) мониторинг скважин грунтовых вод для руководства в области водоснабжения.

Для удовлетворения определенных потребностей пользователей может потребоваться организация сетей специального назначения или проектных сетей (или отдельных станций). Пользователь в таком случае оплачивает и приобретает лишь ту продукцию, которая может быть заархивирована или распространена только по запросу пользователя. Руководители гидрологической службы должны изыскивать такие возможности. Проекты специального назначения дают гидрологической службе много преимуществ, включая увеличение дохода, распределение накладных расходов среди более широкого круга пользователей, возможность развивать новые навыки, укрепление структуры и поддержки, а также развитие инноваций. Данные, полученные благодаря таким видам деятельности, могут также дополнять информацию, полученную с основной национальной сети.

2.2.6 **Оценка продукции и обслуживания и менеджмент качества**

Заключительной стадией в маркетинге является получение отзывов пользователей на продукцию и обслуживание. Есть много способов получения отзывов. Возможно, самый простой — это дружеский телефонный звонок спустя несколько дней после поставки продукции, чтобы узнать, оправдала ли она ожидания пользователя. В более формальном случае пользователей можно попросить заполнить простую анкету. Возможно, наиболее оптимальным инструментом оценки должна стать организация проведения опроса о степени удовлетворенности пользователей. По

существу, цель такого опроса состоит в том, чтобы определить первоначальные ожидания пользователя и определить степень их удовлетворения. Одним из путей удовлетворения пользователей является создание структуры менеджмента качества, гарантирующей разработку продукции в соответствии с точными, воспроизводимыми и согласованными процедурами и стандартами.

Установленные стандарты являются краеугольной основой для обеспечения качества продукции и обслуживания гидрологической службы. Все чаще пользователям необходимо знать, какие стандарты были использованы гидрологической службой для удовлетворения их потребностей. Как правило, стандарты могут быть определены как для методик, которые используются гидрологической службой, так и для характеристик продукции, которую эта гидрологическая служба производит. Важно помнить, что стандарты необходимы не только для технических мероприятий, связанных со сбором гидрометрических данных и предоставлением метаданных, но также и для всех других видов деятельности, осуществляемых гидрологической службой, например финансов, работы персонала и долгосрочного планирования. Обзор стандартов Международной организации по стандартизации (ИСО) для метаданных применительно к ВМО можно найти по адресу: <http://www.wmo.int/pages/prog/www/WDM/reports/ET-IDM-2001.html>.

Менеджмент качества должен осуществляться на систематической основе. Другими словами, гидрологическая служба должна иметь систему менеджмента качества соответствующего уровня, которая гарантирует пользователям, что ее продукция и обслуживание отвечают стандартам качества, которые были определены для них. Служба может считать, что применение хорошо документируемой системы менеджмента качества также может быть очень полезно в случае судебных разбирательств в отношении данных и информационной продукции.

Комплексная система менеджмента качества часто воспринимается как дорогостоящая в использовании. Однако на практике система менеджмента качества не должна отличаться от процедур управления данными/продукцией, которые гидрологическая служба использует для проведения измерений и их передачи для камеральной обработки, архивации и доставки пользователям. Эффективное выполнение этих процедур требует следующего:

- a) задокументированных процедур для каждого этапа потока данных и информации;
- b) установленных стандартов для процедур измерения и обработки, как для самих измерений (данных), так и для производной продукции;

- c) подготовки кадров и краткого обзора;
- d) распределения обязанностей;
- e) четким образом зарегистрированных данных.

Эти элементы управления данными также являются компонентами менеджмента качества. Комплексная система менеджмента качества может включать дополнительные компоненты, например:

- a) проверку соблюдения стандартных процедур, например путем независимых проверок кривых расходов или полевых работ;
- b) валидацию, позволяющую убедиться, что архивуемые данные отвечают установленным стандартам, например, путем перекрестного сравнения между близлежащими станциями;
- c) задокументированное подтверждение того, что все аспекты системы постоянно проверяются, например, наличие отметок о прохождении учебной подготовки каждого сотрудника.

И хотя затраты на качество, подразумеваемого высоким, обычно воспринимаются как высокие, стоимость низкого качества вполне может быть даже выше. Гидрологическая служба может обнаружить, что наблюдения, выполняемые на протяжении нескольких лет, оказались непригодными из-за нераспознанной до настоящего времени ошибки в приборе, или что необходимо полностью переработать измерения расхода воды, потому что параметры плотины были оценены неправильно. Такие меры по исправлению положения приводят к гораздо более высоким затратам, чем были бы, если бы проводилась начальная проверка прибора или кривой расходов.

2.2.7 **Правовая основа для ведения деятельности и организационные аспекты**

Почти все страны имеют гидрологические службы, которые были специально учреждены на основе какого-либо юридического инструмента или выполняют функции, делегированные или разрешенные законодательством. Однако в некоторых случаях в законодательстве не установлено определенное учреждение или даже не указано правительственное учреждение, которое должно собирать гидрологическую информацию в процессе выполнения других обязанностей. В таких случаях полномочия могут предоставляться в рамках ежегодного выделения средств, а не в порядке принятия закона, регламентирующего гидрологическую деятельность.

Самые разнообразные юридические или «квазигирические» инструменты предоставляют различные полномочия, например государственная водная политика, устав или закон, водный кодекс, постановление, указ или межведомственное соглашение в зависимости от

системы управления. ВМО (1994 г.) обеспечивает множество тематических исследований, которые отражают разнообразные возможные организационные схемы. Сегодня во многих странах управление водными ресурсами ведется в соответствии с водным законодательством, законом, учреждающим головную организацию водного сектора, такую как национальный совет по водным ресурсам, законом об охране окружающей среды, законом о рациональном использовании природных ресурсов или подобными законодательными актами. В этих случаях акцент в законодательстве делается на аспектах управления ресурсами, например, их распределении, ресурсном ценообразовании или лицензировании. Гидрология может получить лишь передаточные полномочия, например, ей могут быть предоставлены полномочия на сбор соответствующей информации.

Существует заметная тенденция к учреждению организаций, ориентированных на речные бассейны, которые несут всестороннюю ответственность за управление водными ресурсами, включая предоставление информации, связанной с водой. Такие организации сегодня можно найти на всех континентах. Во многих случаях такие речные бассейны и их организации являются транснациональными, как например Управление бассейна реки Замбези в Южной Африке. В некоторых странах наблюдается полный охват их территории агентствами по управлению речными бассейнами, тогда как в других охвачены только основные реки. Управление водными ресурсами агентствами по вопросам речных бассейнов или гражданскими администрациями федерального подчинения приводит к необходимости гармонизировать стандарты, координировать обмен данными, избегать дублирования и обеспечивать государственные интересы. Эти задачи могут быть возложены на государственную головную организацию и выполнены ее секретариатом, который может быть представлен национальной гидрологической службой или быть полностью независимым. В таких случаях совершенно необходима межведомственная координация и взаимодействие.

Усложнение процесса принятия решений в водном секторе вместе с множеством заинтересованных сторон и участников, часто имеющих противоречащие интересы, требует четкого определения роли и обязанностей каждого участника. Для содействия основной задаче комплексного использования водных ресурсов необходимо, чтобы данные и информация были доступными для всех участников. Поэтому для основы деятельности гидрологической службы желательно наличие соответствующих правовых рамок и неких правовых инструментов. В частности, такие правовые рамки могут быть необходимы для предоставления гидрологическим службам полномочий на осуществление видов деятельности или функций, таких как

оспаривание прав частной собственности в порядке обеспечения защиты станции, используемой для мониторинга; взимание платы за предоставление продукции или обслуживания; формулирование требований к другим организациям, включая организации, принадлежащие к частному сектору, для предоставления копий данных с целью добавления в государственные архивы; межгосударственная деятельность и взаимодействие.

Когда пересматриваются законы, связанные с водными ресурсами, руководителям гидрологических служб необходимо стремиться участвовать в процессе их составления. В частности, им необходимо постараться ввести в действие меры, которые успешно применялись в других странах, и попытаться воплотить их в свое национальное законодательство. Контакты с другими организациями, такими как ВМО и рабочие группы ее региональных ассоциаций, помогут получить полезные идеи. Публикации ВМО также обеспечивают практическое руководство (см. ВМО, 1994 г., 2001а г.).

Функции национальной гидрологической службы могут взять на себя национальная гидрометеорологическая служба, одна из основных отраслевых гидрологических служб или федеральная гидрологическая служба, осуществляющая надзор за различными областными или региональными гидрологическими службами.

В ходе опроса 67 стран, выполненного в 1991 г. (ВМО, 2001а г.), были выделены четыре основных модели организации гидрологических служб на национальном уровне. Около 51 % опрошенных стран имели национальные гидрологические или гидрометеорологические агентства; 1 % — региональные (федерального подчинения) гидрологические или гидрометеорологические агентства; 42 % — и национальные, и региональные гидрологические или гидрометеорологические агентства; 6 % — не имели ни национальных, ни региональных гидрологических или гидрометеорологических агентств.

Организационные схемы гидрологической службы очень разнообразны. Многие зависят от правовой системы, правительственной структуры и стадии экономического развития. Успешные примеры свидетельствуют о том, что оперативная гидрология может осуществляться при самых разнообразных обстоятельствах. Хотя руководители гидрологической службы, возможно, ограниченно влияют на организационные аспекты на национальном уровне, они должны использовать любую возможность для участия в организационной реструктуризации. Они должны опираться на опыт руководителей гидрологических служб из других стран для того, чтобы

предложить изменения, которые позволят повысить эффективность работы их гидрологической службы.

На уровне отдельной гидрологической службы организационная структура будет в значительной степени зависеть от задач, продукции и видов деятельности. Поскольку они постоянно развиваются, то должна развиваться и структура.

Руководители гидрологической службы должны учитывать опыт других служб, рассматривая соответствующие организационные структуры. Расширенная информация о преимуществах различных организационных моделей, таких как пирамидальные или линейные организационные структуры, всегда является полезной.

В стране с несколькими гидрологическими службами установленные стандарты имеют особенное значение для обеспечения сопоставимости гидрологических данных и видов продукции. Ключевая роль национальной или головной гидрологической службы заключается в установлении национальных стандартов. То же самое можно сказать о международных речных бассейнах, в которых функционирует несколько национальных гидрологических служб. В этом случае ключевым фактором организации речного бассейна является установление стандартов для всего бассейна и оказание помощи национальным гидрологическим службам в их соблюдении.

Технический регламент, том III — Гидрология (ВМО-№ 49), обеспечивает ряд общепринятых технических стандартов наряду с Руководством ИСО 16 — Measurement of Liquid flow in Open Channels (Измерение потока жидкости в открытых каналах) (ISO, 1983).

Технические стандарты, принятые гидрологической службой, обеспечивают объективную основу для контроля и оценки. Эти стандарты должны быть инкорпорированы в задачи гидрологической службы.

2.2.8 **Поддержание деловых отношений с другими учреждениями**

Вода жизненно важна для многих секторов экономики, и можно предположить, что многие как правительственные, так и неправительственные организации проявляют интерес к водным ресурсам. Действительно, в большинстве стран имеется несколько организаций, занятых в различных аспектах гидрологии, причем за мониторинг поверхностных вод, грунтовых вод и качества воды обычно отвечают различные организации. Даже если существует специально созданная национальная гидрологическая или национальная гидрологическая и метеорологическая служба

(НМГС), между различными гидрологическими учреждениями, скорее всего, будут сложные взаимоотношения. Поскольку интегрированное управление водными ресурсами и принципы управления речными бассейнами получают все более широкое распространение, отношения между организациями, занимающимися вопросами водных ресурсов, будут становиться все более тесными.

Ключевые области сотрудничества для гидрологических служб включают:

- a) обмен данными и информацией между гидрологическими службами в составе различных ведомств и национальной гидрологической службой, если она существует;
- b) соглашения о сотрудничестве, которые позволяют избежать дублирования и совместно использовать технологии, например посредством совместной эксплуатации сетей наблюдений или средств обслуживания (например, лаборатории калибровки приборов), совместного приобретения гидрологического программного обеспечения или приборного оснащения, а также проведения совместных взаимных сравнений приборов в полевых условиях для обеспечения качества;
- c) передача данных и информации организациям пользователей, которым требуется гидрологическая информация для управления ресурсами или других целей;
- d) сотрудничество с учреждениями, занимающимися вопросами предотвращения стихийных бедствий и ликвидации их последствий, и национальной метеорологической службой для выпуска прогнозов и предупреждений об экстремальных гидрологических явлениях;
- e) совместные научно-исследовательские проекты и проекты в области развития с университетами или научно-исследовательскими институтами, при выполнении которых гидрологическая служба извлекает выгоду из научных исследований и разработок, а научно-исследовательская организация извлекает пользу из доступных данных, полевых установок и возможностей для аспирантов проводить научные исследования;
- f) сотрудничество и взаимодействие между гидрологическими службами и национальной метеорологической службой в целях обмена гидрологическими и климатическими данными и совместного использования технологии для управления данными.

В большинстве стран сотрудничество в водном секторе представляется настолько важным для национальных интересов, что учреждается центральная организация, как например национальный совет по водным ресурсам. Положение и полномочия таких органов очень разнообразны. В некоторых случаях

они являются в значительной степени консультативными и имеют ограниченное влияние. В других они находятся под председательством премьер-министра или отчитываются непосредственно перед ним и наделены значительными полномочиями. Гидрологические службы всегда получают пользу от такой организационной схемы.

Многие прибрежные страны разделяют речные бассейны с другими странами, и страны, расположенные вниз по течению рек, такие как Бангладеш, Камбоджа, Египет и Гамбия, в большой степени зависят от вышерасположенной части потоков. В идеальном случае, для того чтобы иметь возможность прогнозировать сток и выпускать предупреждения, их национальным гидрологическим службам необходимо тесно сотрудничать с гидрологическими службами стран, расположенных выше по течению. Организации, занимающиеся речными бассейнами, такие как Комиссия по реке Меконг (www.mrcmekong.org) и Международная комиссия по защите Рейна (<http://www.iksr.org/>), облегчают такие взаимоотношения в некоторых речных бассейнах, хотя и не всегда. Бесспорно, одна из важнейших обязанностей директора гидрологической службы в прибрежном государстве состоит в том, чтобы поддерживать тесные рабочие отношения с должностными лицами, занимающими равнозначные положения в других соответствующих странах — либо на двусторонней основе, либо в рамках соглашений по управлению бассейнами рек, осуществляемым многосторонними организациями по вопросам речных бассейнов.

Многие международные организации оказывают большую помощь национальным водоресурсным учреждениям и гидрологическим службам, поэтому руководителям гидрологических служб необходимо иметь представление о мандатах и запросах таких организаций.

2.2.9 Обмен данными

Механизмы по обмену данными имеют большое значение для гидрологических служб, включая:

- a) национальные гидрологические и метеорологические службы, а также отраслевые гидрологические службы в отдельно взятой стране;
- b) национальные гидрологические службы в трансграничных речных бассейнах;
- c) национальные гидрологические службы в соседних странах, водные ресурсы которых не являются общими, но доступ к данным которых содействовал бы гидрологическому моделированию или анализу;
- d) национальные гидрологические службы и международные организации, заинтересованные в глобальной оценке водных ресурсов и обладающие международными архивами данных;

- е) гидрологические службы, работающие в интересах национальных проектов и оказывающие помощь частному сектору.

В начале 1990-х годов развитие новых технологий и государственная политика поставили под угрозу свободный и неограниченный обмен метеорологическими данными. Поэтому в 1995 г. Конгресс ВМО принял резолюцию 40 (Кг-ХII) — Политика и практика ВМО для обмена метеорологическими и связанными с ними данными и продукцией, включая руководящие принципы по отношениям в коммерческой метеорологической деятельности, — которая явным образом не принимала во внимание гидрологические данные. Четыре года спустя, в 1999 г., Конгресс принял резолюцию 25 (Кг-ХIII) — Обмен гидрологическими данными и продукцией (ВМО, 2001b г.). Эта резолюция касается международного обмена гидрологическими данными и информацией, но ее основные принципы применимы и на национальном уровне. Как было отмечено в разделе 2.5.2, экономически эффективно передавать или обмениваться данными в режиме оплаты, при котором взимается плата только за передачу данных, и это по существу является принципом, выраженным в резолюции 25 (Кг-ХIII). Многие гидрологические службы в последние годы экспериментировали с различными финансовыми схемами в сфере передачи данных, и все пришли к тому, что подход, рекомендуемый резолюцией 25 (Кг-ХIII), является предпочтительным. На практике ситуация сложнее в трансграничных речных бассейнах, где вопросы национального суверенитета и национального развития перевешивают все остальные. В таких условиях национальные гидрологические службы могут только настаивать на соблюдении резолюции 25 (Кг-ХIII).

Многие гидрологические службы считают полезным бесплатно предоставлять данные для образовательных учреждений и международных научных проектов. С другой стороны, если данные должны использоваться для консалтинговой работы, ничто не мешает гидрологической службе требовать оплаты расходов, включающих стоимость получения, проверки, хранения и передачи соответствующих данных.

2.3 ПЛАНИРОВАНИЕ И СТРАТЕГИЯ [ГОМС А00]

Всегда возможно, что наиболее важной обязанностью директора должно быть планирование и стратегическое развитие гидрологической службы. Чтобы успешно реагировать на изменяющиеся условия и потребности, гидрологической службе нужен директор с видением развития на перспективу и способностью действовать. Планирование и стратегическое развитие

подразумевают изменение. Немногим нравятся изменения, особенно если они навязываются, и руководителям гидрологической службы необходимо иметь навыки по управлению процессом преобразований. В частности, возможно, потребуются, чтобы в организационной культуре многих гидрологических служб центр внимания сместился с чисто технических вопросов, в первую очередь, на пользователей.

Руководителям гидрологической службы необходимы планы и стратегии, которые обеспечат гидрологической службе распределение ее ресурсов таким образом, чтобы достигнуть самых важных целей. Разнообразные планы на различные периоды времени должны быть сформулированы так, чтобы соответствовать намеченным целям. Стратегический план обеспечит представление общего направления развития гидрологической службы, например сроком на пять лет. Во времена быстрых перемен трудно предвидеть даже на пять лет вперед, поэтому план должен регулярно обновляться. Годовой план устанавливает конкретные намерения и желательные результаты, которые должны быть достигнуты в течение одного года деятельности; он обычно увязан с бюджетом. План развития сосредоточен на процессе наращивания потенциала гидрологической службы для выполнения ее производственных задач и может рассматривать с этой целью период времени 10 лет или более. Кроме того, могут существовать планы, которые касаются отдельных аспектов деятельности службы, например подготовки кадров.

Комплексный план, вероятно, будет включать некоторые или большинство перечисленных ниже элементов:

- a) концепция развития на перспективу — каким мы хотим, чтобы была наша сфера деятельности;
- b) миссия — обоснование необходимости существования гидрологической службы;
- c) принципы или ценности — фундаментальная и неизменная система убеждений, которые относятся к работе гидрологической службы;
- d) обзор достижений за последний плановый период;
- e) анализ сильных и слабых сторон, возможностей и угроз (СССВУ);
- f) цели и ожидаемые результаты — общие формулировки того, что должно быть достигнуто;
- g) цели и ожидаемые виды выходной продукции — конкретные цели: измеримые результаты и стандарты, а также временные рамки;
- h) действия — конкретные действия, которые будут предприниматься для достижения целей и получения ожидаемой выходной продукции;
- i) финансовый бюджет;
- j) критерии эффективности и индикаторы — показатели, которые будут использоваться для контроля хода работы.

Стратегический или долгосрочный план не конкретизирует отдельные действия и включает в себя только ориентировочный бюджет. В годовом плане при этом кратко можно резюмировать многие разделы существующего стратегического плана и уделить больше внимания описанию предлагаемых действий и увязанному с ними бюджету.

Вышеупомянутый перечень начинается с концепции перспективного развития высокого уровня и заявления о целях, а затем следует оценка работы гидрологической службы и ее фактического состояния (сильные и слабые стороны гидрологической службы), а также окружающей ее деловой среды (возможности для новых производственных задач и угрозы со стороны конкурентов или неблагоприятные изменения в деловой среде). Потом идет конкретизация действий и механизмов оценки их успешности. Не представляет трудностей получение планов других организаций в целях развития идей относительно соответствующих подходов и форматов. К примеру, *Стратегический план ВМО* (ВМО-№ 1028) должен быть доступным для директора гидрологической службы и может быть получен из Секретариата ВМО. Другие службы в сообществе ВМО являются очевидным источником руководящих и методических материалов; например у Австралийского бюро метеорологии (1995, 2005, 2006) имеются планы различных временных масштабов, которые могли бы стать полезными примерами для других служб.

Гидрологическая служба, которая является частью головной организации, может иметь строго определенный формат планирования, составления бюджета и технологического процесса, которого придерживались бы руководители. Однако в гидрологических службах, в которых степень независимости выше, руководители должны относиться к планированию более серьезно. Иногда, когда ресурсов не хватает и кажется, что гидрологическая служба не получает никакого признания или поддержки, планирование может казаться бессмысленным занятием. Тем не менее, возможно, именно в этих условиях планирование является самым необходимым, чтобы идти по пути позитивного развития в будущем и обеспечить импульс для перемен.

План не является исключительно внутренним документом и во всяком случае обычно используется для содействия развитию гидрологической службы и в качестве основания для заключения соглашения или контракта между директором и высшим должностным лицом, которому подотчетен директор. В этом случае план будет согласовываться с этим высшим должностным лицом, а также с персоналом гидрологической службы.

Процедуры планирования являются важнейшим компонентом системы управления и рассматриваются во многих учебниках и программах высших школ в области управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятия. Руководителям гидрологической службы необходимо сделать планирование основной частью своих исследований вопросов организации деятельности службы.

Планирование не должно быть формальным или отнимающим много времени, хотя могут использоваться такие методы, как анализ дисконтированных денежных потоков, чтобы выбрать наиболее перспективные из нескольких альтернативных направлений деятельности. Возможно, самое важное — это эффективно вовлечь в процесс все заинтересованные стороны, т. е. не только высшее руководство, но и весь персонал гидрологической службы, пользователей и потенциальных партнеров. Желательно соединение нисходящих и восходящих идей при помощи консультаций с пользователями и другими заинтересованными сторонами. Директор и верхние эшелоны управления должны осуществлять полное руководство службой на основе понимания ими более широкой деловой и политической среды. Другие сотрудники могут иметь практический взгляд на достоинства и недостатки плана, а также личные деловые связи с клиентами и участниками коллективной работы. Как правило, отдельные подразделения вносят предложения по составляющим плана, которые должны быть включены, изменены или опущены согласно выбранной процедуре отбора.

Полезной отправной точкой для оценки современного состояния гидрологической службы является *Water Resources Assessment: Handbook for Review of National Capabilities* (Оценка водных ресурсов — Руководство по обзору национальных возможностей) (WMO/UNESCO, 1997).

Прежде, чем стратегический, годовой или иной план гидрологической службы будет принят к реализации, руководители должны установить четкую связь между планом гидрологической службы и ответственностью и обязанностями ее персонала. Важно, чтобы руководители концентрировали внимание сотрудников персонала на результатах, которых они должны достигнуть, а не просто на задачах, которые они должны выполнять.

Существенно важным аспектом планирования является оценка результатов работы за прошлый период. Во многих странах от правительственных учреждений требуется представлять годовые отчеты национальному собранию избранных представителей, которое дает окончательную оценку эффективности их

работы. Даже там, где они не обязаны это делать, руководители гидрологических служб должны, по крайней мере, ежегодно анализировать деятельность их служб, достижения и изменяющиеся условия деловой среды. Результаты могут быть представлены разными способами и с разной степенью детализации для различных аудиторий. Для избранных представителей и потребителей — кратко, сосредотачивая внимание на вкладах в жизнь общества на национальном уровне; для персонала — подробно, выдвигая на первый план технические вопросы и вопросы продукции/обслуживания; для руководства и аппарата планирования — всесторонний, включающий анализ недостатков и неблагоприятных изменений в окружающей деловой среде.

Оценка работы всей гидрологической службы обеспечивает основу для определения ее сильных и слабых сторон и разработки плана, который будет опираться на преимущества и устранять любые недостатки. Руководителям необходимо оценить работу гидрологической службы на основе критериев и показателей эффективности, предварительно определенных планом, и рассмотреть, насколько успешно гидрологическая служба реализует свои концепцию развития и миссию, а также правительственную политику и задачи. Обратная связь с пользователями из государственного и частного секторов является важнейшим элементом оценки эффективности работы. Гидрологическая служба, которая обеспечивает технически первоклассную продукцию, но которая в малой степени способствует решению государственных задач или удовлетворению потребностей деловых партнеров, вряд ли получит постоянную поддержку или финансирование на будущие плановые периоды.

2.4 УПРАВЛЕНИЕ ЛЮДСКИМИ РЕСУРСАМИ И НАРАЩИВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА [ГОМС А00, У00]

2.4.1 Управление

Большинство организаций считают персонал своим самым важным ресурсом. Это верно, и руководители добившихся успехов гидрологических служб это хорошо знают. Поскольку роль и функции гидрологической службы постоянно меняются, кадровые потребности и стиль управления гидрологической службой, возможно, также требуется менять. Таким образом, гидрологическая служба, которая адаптируется к современным требованиям или разрабатывает продукцию с добавленной стоимостью, по всей видимости, будет нуждаться в большей степени в квалифицированном персонале в области информационных технологий. Такой персонал будет выполнять свои

задачи иным образом, нежели сотрудники с навыками традиционной работы в полевых условиях, и потребуются другие уровни руководства и стиль работы.

Долговременная успешность и техническое состояние гидрологической службы относятся к ведению ее руководителей. Для выполнения своих обязанностей эффективным образом им требуются профессиональные знания в различных областях. Директор обязан обеспечить наличие у всего руководящего состава следующих положительных качеств:

- a) дипломатические и административные навыки, чтобы успешно функционировать в деловой среде государственной службы или как государственная компания;
- b) способность следить за состоянием производственной деятельности, понимать ее и применять это умение при планировании программ гидрологической службы;
- c) профессиональные навыки во всех областях организации деятельности гидрологической службы — в области людских ресурсов, финансов, основного капитала, качества продукции, информационных технологий — в зависимости от потребностей службы;
- d) навыки лидерства и личная мотивированность;
- e) маркетинговые и коммуникационные навыки, которые необходимы для налаживания эффективных отношений с пользователями, общественностью и избранными представителями, инвесторами/учреждениями-донорами и «собственником»;
- f) технические и научные знания, необходимые для того, чтобы у гидрологической службы имелись технологии, в которых она нуждается;
- g) способность представлять гидрологическую службу и государственные интересы на международном уровне.

Директору необходимо уделять в равной мере внимание подготовке кадров и наращиванию технического потенциала.

Поскольку персонал действительно является самым важным ресурсом, руководители должны тщательно подбирать его сотрудников. Им необходимо назначать или переназначать сотрудников согласно потребностям стратегических и годовых планов службы таким образом, чтобы у рабочих групп было достаточно людских ресурсов для достижения поставленных целей. Директор должен серьезно относиться к преемственности персонала, то есть выявлять и подготавливать младших сотрудников для перехода на более ответственные должности вследствие ухода на пенсию старших сотрудников. Для надлежащей подготовки такого персонала необходимо сочетание опыта и профессиональной подготовки.

Контракт между гидрологической службой и сотрудником — существенная основа для эффективного и справедливого управления рабочим коллективом. Юридические требования относительно трудовых договоров изменяются от страны к стране, и руководители гидрологических служб должны быть знакомы с трудовым законодательством, в соответствии с которым они работают. Для гидрологической службы, которая является полугосударственным или государственным органом, форма договорных отношений для служащих обычно определяется национальными инструкциями государственной службы.

Директор гидрологической службы, которая испытывает недостаток в точно определенных условиях трудовых контрактов, должен серьезно рассмотреть вопрос об их разработке. Основное преимущество договорного соглашения и для работодателя, и для работника заключается в том, что отношения являются определенными и прозрачными, позволяя объективно рассматривать любые недостатки с обеих сторон.

Должностная инструкция для каждого сотрудника — важный инструмент управления. Она обеспечивает и ясную формулировку того, что служба ожидает от физического лица, и основу для установления личных целей, служебной аттестации и определения возможностей для повышения квалификации и личного развития.

Должностные инструкции и задачи служат основой для оценки эффективности работы сотрудников, которая для руководителей и персонала гидрологической службы сравнима по важности с планированием и стратегией в области развития. Во многих организациях оценка эффективности работы связана с подготовкой планов повышения квалификации отдельных сотрудников или для трудовых коллективов (например рабочей группы, которая, как ожидается, примет на себя новые обязанности), или для всей службы. Планы повышения квалификации будут использоваться для проведения будущих служебных аттестаций, частично гарантируя, что предложения были осуществлены, и оценивая их успех как средство для совершенствования выполнения работы.

Когда определяются инструменты управления людскими ресурсами, такие как должностные инструкции, постановка задач и введение служебной аттестации, сотрудники могут противодействовать или быть настроены скептически. Однако руководитель убедится, что они будут более склонны идти на сотрудничество в случае, если инструменты, позволяющие улучшить их перспективы, будут использоваться разумно, конструктивно и последовательно в течение одного года или двух лет. Следует всячески подчеркивать, что инструменты управления должны использоваться

с пониманием; в противном случае они, вероятно, принесут мало пользы, и даже приведут к обратным результатам. Это означает, что директору и руководителям гидрологической службы необходимо обеспечить соответствие их собственной работы потребностям службы.

2.4.2 **Подготовка и переподготовка кадров**

Подготовка и переподготовка кадров имеют важнейшее значение и для руководителей, и для персонала, поскольку общая цель заключается в предоставлении сотрудникам возможности внести наибольший вклад в достижение целей и задач службы. Подготовка и переподготовка кадров должны проводиться организовано, возможно, с помощью учебного плана для службы или для отдельных сотрудников. План должен соответствовать анализу потребностей в обучении, которые являются частью процесса оценки работы. Эти исследования могут также быть выполнены независимо, например, когда руководители рассматривают новые процедуры, продукцию или обслуживание, изменение организационной структуры или какой-либо другой отклик на изменения в рабочей среде и когда есть потребность соответствовать текущим профессиональным требованиям.

2.5 **УПРАВЛЕНИЕ ФИНАНСАМИ И РЕСУРСАМИ [ГОМС А00]**

Управление финансами стало основным аспектом работы директора, поскольку правительства во всем мире устанавливают строгую финансовую дисциплину. Обычно процедуры финансового управления определяются головной организацией гидрологической службы, а директор и/или выделенный управленческий персонал проходят соответствующее обучение этим процедурам. Однако директор должен приложить все усилия, чтобы развить как можно более глубокое понимание финансового управления, чем базовый минимум.

Процедуры бухгалтерского учета в государственном секторе, как правило, устанавливаются правительством, и гидрологическая служба, являясь частью правительственного ведомства или предприятием, принадлежащим государству, должна тщательно следовать им. Это необходимо для обеспечения прозрачности и финансовой отчетности, т. е., чтобы убедиться, что финансовые счета службы ясны и вразумительны, средства израсходованы по назначению, обязательства по финансовым сделкам четко определены, а денежные средства не «распиливаются» при помощи коррупционных механизмов (это, к сожалению, жизненный факт как в развитых, так и в развивающихся странах).

2.5.1 Источники дохода

Главной проблемой руководителей гидрологической службы — по сути, любой организации — является источник дохода или денежных поступлений, необходимых для поддержания деятельности службы и основных ресурсов. В большинстве стран основным источником финансирования являлось и по-прежнему является правительство.

Последние тенденции во всем мире — правительства требуют или позволяют организациям государственного сектора находить источники коммерческого дохода в дополнение к ассигнованиям из национального бюджета. Некоторые службы достигли существенных успехов в выявлении неправительственных потребителей или добровольных потребителей в пределах государственного сектора. Продукция с добавленной стоимостью и обслуживание являются наиболее выгодными. Служба должна сосредоточить свою энергию на поиске новых источников денежных поступлений только в областях, которые являются совместимыми с ее основным мандатом, и где может быть сделано экономическое обоснование, предусматривающее получение прибыли.

Коммерческая деятельность требует правовых полномочий, и руководители гидрологических служб, которые участвуют в коммерческой деятельности, должны быть знакомы с национальными законами и правилами, касающимися коммерческой деятельности.

В большинстве стран есть относительно небольшое число неправительственных клиентов гидрологической продукции с добавленной стоимостью, которые являются потенциальными источниками значительного коммерческого дохода. Особенно характерна такая ситуация для развивающихся стран, где давление на гидрологическую службу по поиску дополнительных источников дохода, вероятно, будет самым большим. Большинство видов продукции и обслуживания гидрологической службы, базы данных и другие активы, которые необходимы для предоставления этой продукции и обслуживания, являются общественным товаром, для которого закономерным покупателем является правительство. От гидрологической службы, тем не менее, может потребоваться самостоятельно компенсировать некоторую часть затрат на производство своей продукции и обслуживания для общества.

Экономическая теория указывает, что надлежащий подход к возмещению затрат заключается во взимании с потребителя платы за прямые и косвенные накладные расходы, связанные с предоставлением продукции или обслуживания, включая административную

стоимость восстановления затрат, а также величину обесценивания используемых активов. В тех случаях, когда для получения продукции или услуги была использована гидрологическая база данных или другой ресурс, обеспеченный государственными расходами, экономически неэффективно пытаться требовать с потребителя часть стоимости используемого ресурса. Потенциальные клиенты категорически возражают против таких нагрузок и даже отказываются использовать службу вообще. Это приводит к недостаточному использованию общественных активов, использованию худших альтернатив, таких как догадки, и, как следствие, к экономической неэффективности. Опыт гидрологических служб, которые пытались брать плату только за данные, в целом подтверждает это. Все шире распространяется мнение, что предпочтительнее обеспечить неограниченный, открытый и бесплатный доступ к данным через Интернет. Это уменьшает стоимость встречных запросов данных и может способствовать повышению репутации гидрологической службы.

В качестве средства наведения финансовой дисциплины и достижения максимальной прозрачности правительство может счесть необходимым распоряжаться денежными средствами другими способами, помимо выделения средств из государственного бюджета. К ним относятся:

- a) предоставление средств через неправительственные организации, как, например, национальный научно-исследовательский совет, который выделяет средства на конкурсной основе и/или в зависимости от государственных потребностей в информации;
- b) создание гидрологической службы в виде государственного предприятия и управляющего государственными средствами на основе госзаказа на определенные виды продукции и обслуживания. В крайнем случае, госзаказ может быть присужден на конкурсной основе другому потенциальному поставщику;
- c) подписание государственного контракта между соответствующим министром и/или министром финансов и руководителем гидрологической службы на предоставление определенных видов продукции и обслуживания.

Маловероятно, что директор гидрологической службы окажет большое влияние на такое решение, которое будет отражать общую правительственную политику. Тем не менее, директору необходимо обратиться за консультациями к другим директорам в аналогичных обстоятельствах, либо в других организациях той же страны, или в гидрологических службах других стран, и попытаться согласовать договорные отношения, которые обеспечат наиболее благоприятные условия для дальнейшей работы.

И наконец, стоит напомнить о том, что одним из способов повышения реального дохода является сокращение затрат, например, распространяя информацию не на бумаге, а через Интернет. Разумеется, гидрологическая служба должна гарантировать, что качество продукции или обслуживания не пострадает, но такая форма будет предпочтительнее с точки зрения пользователя.

2.5.2 **Составление бюджета и контроль финансовой деятельности**

Составление бюджета должно быть неотъемлемой частью годового планирования. Поскольку гидрологическая служба определяет предполагаемую программу своих целей и деятельности, необходимо определить связанные с этим расходы и, через итерационный процесс, пересмотреть предложенную программу так, чтобы ее расходы соответствовали вероятным доходам. Также желательно привлечь работников оперативного персонала как к ежегодному планированию, так и к формированию бюджета. Им предстоит, в конце концов, работать с бюджетом и оставаться в его рамках.

Как правило, процедуры составления бюджета и календарного плана гидрологических служб, являющихся полугосударственными или государственными организациями, строго расписаны. Поэтому ежегодный процесс планирования должен быть распределен по времени. От гидрологической службы, вероятно, потребуется представлять свой бюджет в установленном формате головной организации в соответствии с заданными статьями затрат в плане бухгалтерских счетов. Руководителям службы необходимо будет принять необходимые меры, чтобы внутренний процесс подготовки бюджета обеспечивал конечный результат, который может быть легко преобразован в требующийся формат, но они могут предпочесть использовать формат, который более соответствует производственной деятельности службы или является более простым в использовании.

Завершенный бюджет должен быть важнейшим компонентом годового плана и средством мониторинга эффективности работы по отношению к плану.

2.5.3 **Управление материальными ресурсами**

Говоря простым языком, задача управления материальными ресурсами состоит в том, чтобы гарантировать, что ценность ресурсов организации поддерживается, и поэтому организация продолжает оставаться действующим предприятием, которое имеет достаточные ресурсы для занятия производственной деятельностью. Таким образом, управление ресурсами

имеет существенное значение для всех руководителей гидрологической службы и ее персонала. Управление ресурсами в основном включает их приобретение, замену, сохранение, защиту и распоряжение ими.

2.5.4 **Безопасность баз данных**

Самым важным ресурсом гидрологической службы является ее база данных. Средства защиты этого ресурса будут зависеть от носителей данных, которые используются, но нет сомнений, что директор службы должен обеспечить защиту. В ряде стран проекты восстановления данных были необходимы для консолидации всех данных: первоначальные отчеты, обычно представленные на бумаге, размещают в безопасном месте и преобразовывают их в электронный формат, которым легче управлять на долговременной основе. Такие проекты замечательны, хотя необходимость в них, возможно, должна возникать только при обстоятельствах, абсолютно не управляемых гидрологической службой. У директора, который позволяет основному ресурсу своей службы деградировать, оправданий немного.

Бумажные носители, например записи наблюдателей, ленты самописцев и перфорированные ленты, являются неоценимыми, поскольку они обычно обеспечивают первоначальную отчетность, с которой нужно сверяться, если возникают вопросы о достоверности данных или по каким-либо причинам требуется повторная обработка данных. Они должны быть сохранены таким способом, чтобы подвергаться наименьшему ущербу от насекомых, воды, гнили, солнечного света, огня, землетрясения или простой потери. Первоначальные отчеты должны быть под ответственностью единого учреждения; однако, если такая схема невозможна, подобным образом один сотрудник в каждом учреждении, в котором хранятся отчеты, должен нести за них ответственность. В любом случае местонахождение подлинников документов должно тщательно отслеживаться, например, когда их передают для повторной обработки. В случае, когда гидрологическая служба не имеет средств или опыта для архивирования данных на бумажных носителях, в этом деле смогут помочь государственный архив, музей или библиотека.

Поскольку бумажные носители подвержены ухудшению состояния, с них должны быть сделаны копии. Обычно делают микрофильм или микрофиши, но устаревание этой технологии создает трудности для будущего. Система электронного хранения отсканированных изображений — в наши дни экономичная альтернатива, использующая компакт-диски или другие носители высокой плотности записи информации. В этом случае технологическое устаревание — возможно, еще большая проблема, чем микрофильм;

таким образом, гидрологическая служба будет нуждаться в регулярном перемещении электронных архивов на носители информации следующих поколений.

Безопасное долговременное хранение оригиналов и обработанных записей в электронной форме, например поступающей телеметрической информации от дистанционных измерительных приборов или всей компьютерной базы данных, требует процедур, которые не так сложны, как порядок обслуживания. Крайне необходимо делать регулярные, частые резервные копии данных, следуя строго определенным процедурам, с тем чтобы данные не были потеряны прежде, чем они достигнут архива, и также делать такие расширенные комментарии к заархивированным данным, чтобы последующие пользователи смогли понять любые изменения, которые были внесены.

Ссылки и дополнительная литература

- Всемирная Метеорологическая Организация, 1995: *Сокращенный окончательный отчет с резолюциями Двенадцатого Всемирного метеорологического конгресса*. (ВМО-№ 827), Женева.
- , 1999: *Сокращенный окончательный отчет с резолюциями Тринадцатого Всемирного метеорологического конгресса*. (ВМО-№ 902), Женева.
- , 2006: *Технический регламент*, том III — Гидрология. (ВМО-№ 49), Женева.
- , 2007a: *Сборник основных документов № 1*. (ВМО-№ 15), Женева.
- , 2007b: *Стратегический план ВМО*. (ВМО-№ 1028), Женева.
- Australian Bureau of Meteorology, 1995: *Long-term Plan 1995–2010*. Commonwealth of Australia, Bureau of Meteorology, Melbourne.
- , 2005: *Strategic Plan 2005–2010*. Commonwealth of Australia, Bureau of Meteorology, Melbourne (<http://www.bom.gov.au/info/leaflets/strategic-plan-2005-10.pdf>)
- , 2006: *Operational Plan 2005–06*. Commonwealth of Australia, Bureau of Meteorology, Melbourne.
- European Commission, 2000: *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. Water Framework Directive, European Union, Brussels (http://www.wmo.ch/pages/prog/www/ois/Operational_Information/coolC14Sky/VolumeD/Amendments/AdditionalDataProducts/02_Resolution%2040.pdf).
- International Organization for Standardization, 1983: *Measurement of Liquid Flow in Open Channels*. ISO Standards Handbook 16, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1994: *The Legal Basis and Role of Hydrological Services* (M.P. Mosley). (WMO/TD-No. 602), Geneva.
- , 2001a: *The Role and Operation of National Hydrological Services* (P. Mosley), Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 72 (WMO/TD-No. 1056), Geneva.
- , 2001b: *Exchange of Hydrological Data and Products* (P. Mosley), Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 74 (WMO/TD-No. 1097), Geneva.
- /United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1997: *Water Resources Assessment: Handbook for Review of National Capabilities*. Geneva and Paris.

КОМПЛЕКСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

3.1 ВВЕДЕНИЕ

3.1.1 Устойчивое развитие водного хозяйства

В последние четыре десятилетия растет осознание того, что природные ресурсы ограничены, и в будущем при их освоении с этим придется считаться. Концепция устойчивого развития получила широкое признание. Эта концепция понимается людьми по-разному, однако здесь мы используем определение, принятое Международным союзом охраны природы (МСОП), Программой Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) и Всемирным фондом природы (ВФП): «Устойчивое развитие — есть улучшение качества жизни человека в рамках существующих возможностей сохранения и поддержания экологических систем» (IUCN/UNEP/WWF, 1991).

Существует ли какой-либо способ измерить устойчивость развития? Можно утверждать, что если принять во внимание естественную изменчивость и тренды в наличии водных ресурсов, то результаты развития будут отражены в изменениях в ресурсной базе. Так называемый экологический след — это площадь территории и водной акватории, необходимой для производства используемых нами ресурсов и поглощения и переработки наших отходов (см. например, <http://www.footprintnetwork.org/>). По имеющимся оценкам, на данный момент население планеты имеет экологический след, превышающий на 20 % биопотенциал Земли. Мониторинг количества и качества воды в природных системах — реках, озерах, подземных водах, снеге, льде — становится, таким образом, необходимым условием для определения того предела, до которого такое развитие может быть устойчивым.

Создание адекватных баз данных по результатам мониторинга гидрологических систем является фундаментальным условием для оценки и эксплуатации водных ресурсов. Целью данной главы является рассмотрение соответствия нынешней сети мониторинга водных ресурсов и используемых методов современным требованиям в свете меняющейся ресурсной базы и философии подходов к управлению водным хозяйством в контексте его устойчивого развития.

3.1.2 Меняющийся характер ресурсов

3.1.2.1 Естественные изменения

Под воздействием метеорологических условий гидрологическая система постоянно меняется. На протяжении

длительных периодов времени — от десятилетий до тысячелетий — изменения в поступлении солнечной энергии через атмосферу приводят к важным изменениям в гидрологическом режиме. Например, изменения в распространении и протяженности ледовых массивов и растительного покрова обычно приводят к изменениям гидрологических характеристик.

В последнее время установлено, что взаимодействие между атмосферой и океаном чрезвычайно важно с точки зрения климата. Явление Эль-Ниньо, охватывающее обширные пространства, может иметь далеко идущие гидрологические последствия, приобретающие особую важность, когда они ассоциируются с засухами и наводнениями. Длительные явления, такие как тихоокеанские десятилетние колебания и их отклик в удаленных районах, также могут влиять на гидрологические системы.

Природные явления совсем другого типа, такие как сильные вулканические извержения с выбросами в атмосферу большого количества пыли и газов, также могут сильно влиять на гидрологическую систему.

3.1.2.2 Изменения, вызванные человеком

Деятельность человека оказывает все большее влияние на гидрологические системы. К наиболее важным видам такой деятельности можно отнести следующие:

- a) строительство плотин и переброски стока, оказывающие основное влияние на режим стока и перенос наносов на многих реках мира, как и на экологические системы отдающих и принимающих водосборов;
- b) изменения в землепользовании, часто оказывающие влияние на гидрологический режим:
 - i) вырубка леса, часто приводящая к резкому увеличению пиков паводков и увеличению почвенной эрозии;
 - ii) осушение переувлажненных земель, часто приводящее к изменению режима стока;
 - iii) строительство дорог и железнодорожных путей, вызывающее эрозию, изменения в заселении и землепользовании;
 - iv) занятие сельским хозяйством, приводящее к изменению скорости инфильтрации и режима питания подземных вод;
 - v) урбанизация, увеличивающая интенсивность стекания;

- с) промышленные и городские сбросы сточных вод, а также применяемые в сельском хозяйстве удобрения и пестициды оказывают неблагоприятное влияние на качество воды на многих участках рек;
- д) выбросы в атмосферу парниковых газов, приводящие к изменению климата и соответствующим изменениям гидрологических систем. Согласно Четвертому докладу об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2007 г.), продолжительность, распространение, повторяемость и интенсивность экстремальных метеорологических и климатических явлений претерпят, вероятно, определенные изменения, которые приведут к отрицательным последствиям для биологических систем;
- е) перенос на дальние расстояния загрязняющих атмосферу веществ может причинить экологический ущерб на большом расстоянии от места выброса.

Для того чтобы лучше понять гидрологическую систему, предсказать и эффективно использовать водные ресурсы в будущем, системы мониторинга должны учитывать эти множественные изменения. В частности, антропогенное изменение климата за счёт существенного увеличения содержания парниковых газов в атмосфере на протяжении последних столетий и воздействие этого на гидрологические системы представляют собой огромную проблему для руководителей в области водных ресурсов. Учитывая неопределённость в сценариях регионального климата и большую вероятность того, что в будущем мы будем наблюдать события, аналогов которым не было в истории человечества, необходимость в обеспеченных качеством наборах данных и надежных физически обоснованных моделях высока, как никогда прежде.

3.1.3 **Меняющиеся подходы к управлению водным хозяйством**

Во многих частях мира происходят значительные социально-экономические изменения. Быстрый рост населения, происходящий, в частности, во многих развивающихся странах и особенно в растущих городских центрах в сочетании с индустриализацией и повышением жизненного уровня, увеличили потребности в воде. Загрязнение воды во многих регионах привело к сокращению объемов воды, пригодной к употреблению. Уровни подземных вод снизились во многих регионах. В будущем растущие потребности в воде будут, как правило, превышать имеющиеся в наличии объемы воды, пригодной к употреблению. Таким образом, имеется острая необходимость более рационального и эффективного управления водным хозяйством.

За последние несколько десятилетий в управлении водным хозяйством произошли очень серьезные изменения. Этому способствовали два весьма важных обстоятельства. Во-первых, растущее понимание того, что вода — основополагающий элемент окружающей природной среды. Присутствие воды и ее движение во всех биологических системах есть основа жизни. Вода, земля и биологические системы должны рассматриваться во взаимосвязи, и мониторинг различных компонентов экосистем должен быть гармоничным. Во-вторых, понимание того, что вода абсолютно необходима во всех видах экономической деятельности. Вода необходима для сельского хозяйства и производства пищевых продуктов, для производства многих видов промышленной продукции и энергии. Вода оказывает решающее влияние на здоровье человека. Большие излишки воды (наводнения) или ее недостаток (засухи) могут привести к гуманитарным и экологическим катастрофам.

На рисунке II.3.1 (а) показаны тренды потребления воды в мире с 1900 по 2000 гг. В глобальном масштабе потребление воды возросло в 10 раз, и к 2000 г. в использовании находилась почти половина всех запасов воды. Сельское хозяйство и, особенно, ирригация остаются главными потребителями, несмотря на то что в процентном отношении доля используемой ими воды непрерывно уменьшается — с 90,5 % в 1900 г. до 62,6 % к 2000 г. За тот же период объем воды, потребляемой промышленностью, возрос с 6,4 до 24,7 %; в городах наблюдались такие же темпы роста потребления воды — с 2,8 % в 1900 г. до 8,5 % к 2000 г. (United Nations, 1997).

Каково же потребление воды в каждом крупном регионе мира в течение двадцатого века в сравнении с имеющимися запасами воды? Ответ на этот вопрос

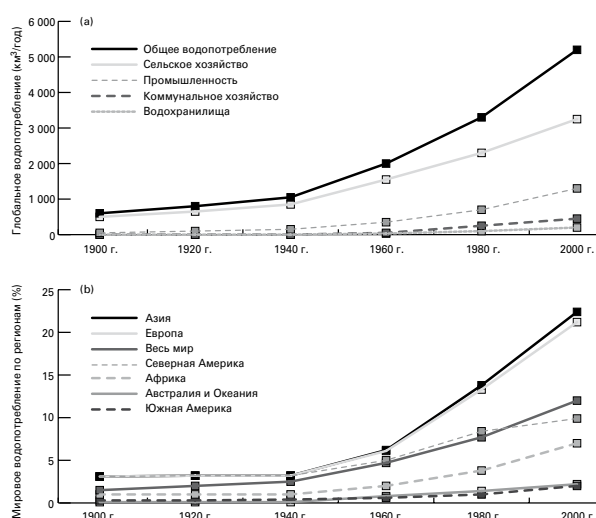


Рисунок II.3.1. Тренды потребления воды в мире по (а) секторам деятельности и (б) регионам

(в процентном отношении) дает рисунок II.3.1 (b), составленный на основании расчета теоретических ресурсов, т. е. речного стока. Согласно этим расчетам очевидно, что в Европе и Азии потребление водных ресурсов более высокое, чем в Северной Америке, Африке и особенно в Южной Америке и Австралии-Океании. Ясно также, что наиболее интенсивно растет потребление воды в Европе и Азии, исключая Южную Америку, где увеличение потребления воды возмещается огромными ее запасами.

Растущее понимание всеобъемлющей природы воды и ее большого значения для природной окружающей среды и деятельности человека выявило необходимость в системном подходе к рациональному потреблению водных ресурсов. Использование ресурсов на нужды человека может оказывать вредное влияние на окружающую среду, в то время как изменение в запасах природных ресурсов может ограничивать или, иначе, сдерживать деятельность человека. Такие изменения привели к системному подходу, известному как комплексное использование водных ресурсов.

3.1.3.1 Управление водосбором

Общепризнано, что природной единицей с точки зрения управления водными ресурсами является речной водосбор. Целесообразно использовать водные ресурсы в пределах речного водосбора комплексно, поскольку часто вода неоднократно используется по мере ее движения от истока к устью. Разумно также комплексно использовать в пределах водосбора все природные ресурсы — растительность, почвы и т. д. Потребности в воде для нужд человека также должны удовлетворяться в пределах водосбора на основании комплексного подхода.

К сожалению, границы политико-административного деления обычно не совпадают с границами водосборов. Реки часто пересекают межгосударственные границы, а в пределах одной страны — границы между отдельными административными территориями. В глобальном масштабе примерно половина поверхности Земли занята речными бассейнами, являющимися межгосударственными, и более 200 бассейнов имеют международный характер.

3.1.3.2 Раздробленное управление

Широко распространено такое положение, когда в отдельном административном районе или стране различными аспектами эксплуатации водных ресурсов руководят несколько различных агентств или учреждений. Департаменты или министерства окружающей среды, сельского хозяйства, энергетики, промышленности и здравоохранения часто имеют противоположные требования к управлению водным хозяйством.

Кроме того, очень часто сеть станций по проведению мониторинга в административной территории оказывается раздробленной как политически, так и организационно. Даже в рамках отдельных агентств осуществление мониторинга количества и качества воды часто не скоординировано. Организационная путаница в вопросах ответственности и полномочий в разных странах и вступающие в противоречия требования разных стран на пользование водой (в пределах межгосударственных бассейнов) представляют собой серьезные проблемы при учреждении и обслуживании эффективных сетей мониторинга.

Должен быть предпринят ряд шагов для того, чтобы система мониторинга работала стабильно, вопреки изменяющимся подходам к управлению водным хозяйством, меняющимся социально-экономическим условиям и изменениям базовых значений ресурсов. Это включает в себя проектирование и организацию функционирования систем мониторинга, хранение и распространение данных, использование этих данных в качестве основы для принятия обоснованных решений, разработку и реализацию водных проектов, а также выпуск гидрологических прогнозов и предупреждений о важных гидрологических явлениях.

3.2 КОМПЛЕКСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ [ГОМС A00]

Этот всеобъемлющий термин может быть определен как включение всех частей водных ресурсов в единое гармоничное целое, координирование их различных элементов.

Комплексное управление водными ресурсами можно разделить на три уровня. Во-первых, оно включает в себя систематическое рассмотрение воды в различных измерениях: поверхностную и грунтовую, ее количество и качество. Суть состоит в том, что вода представляет собой экологическую систему, содержащую взаимосвязанные части. Каждая часть может влиять или находиться под влиянием других частей, и потому планирование и управление каждой частью должно осуществляться с учётом этих взаимосвязей. На этом уровне внимание обычно уделяется тому, как комплексно решать задачи, связанные с безопасностью и качеством воды.

На втором уровне воду рассматривают как экологическую систему, которая также взаимодействует с другими системами ресурсов, ранжированными от наземных до других систем, относящихся к окружающей среде. Второй уровень шире первого и сосредоточен на таких вопросах как управление поймами,

смягчение последствий засух, борьба с эрозией, ирригация, дренажная система, неточечные источники загрязнения, охрана заболоченных территорий и использование ареалов обитания рыбы или живой природы в рекреационных целях. На этом уровне интеграция необходима, потому что многие водные проблемы являются результатом землепользования или других решений, влекущих за собой серьезные последствия для водных систем.

Третий уровень еще шире и направлен на взаимодействие между экономикой, обществом и окружающей средой, компонентом которой является вода. Здесь дело касается степени, в которой вода может способствовать или препятствовать экономическому развитию, снижать уровень бедности, улучшать здоровье и благосостояние и защищать культурное наследие.

Все три уровня выдвигают на первый план то, что специалисты по планированию и управлению имеют дело с совокупностью систем, которая часто включает в себя иерархические отношения. Результатом является то, что основной особенностью комплексного управления водными ресурсами является применение системного или экосистемного подхода. Другой важной особенностью является необходимость быть целенаправленным и ориентированным на достижение результатов, поскольку во всех случаях существует опасность столь широкого определения систем или проблем, что они становятся бесполезными с точки зрения менеджмента.

В соответствии с материалами Межамериканского банка развития (Inter-American Development Bank, 1998) комплексное управление водными ресурсами включает принятие решений в области разработки и управления водными ресурсами для различных целей с учётом потребностей и пожеланий различных пользователей и заинтересованных сторон.

Резюмируя, основными чертами эффективного комплексного управления водными ресурсами является перспективность системы, применение целенаправленного и ориентированного на достижение результатов подхода, партнерские отношения и наличие заинтересованных сторон. В настоящей главе внимание уделяется логическому обоснованию этих аспектов, а также тому, как они применялись на практике, какие главные уроки были усвоены и какие меры предосторожности необходимо принимать во внимание.

3.3

ЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

3.3.1

Количество и качество воды

Ответственность за регулирование количества, снабжения и качества воды во многих случаях закреплена за различными учреждениями. Это может быть связано с историческими административными причинами, которые напрямую не имеют отношения к рассматриваемой теме, равно как и не поддаются логическому обоснованию; при этом подобное разделение повышает эффективность, потому что оно позволяет специалистам сосредоточиться на отдельных аспектах управления водными ресурсами. Результатом этой практики стало деление на две группы или культуры производства специалистов водохозяйственной деятельности, занимающихся вопросами чистой и загрязненной воды, которые действуют отдельно друг от друга.

Большим недостатком этого разделения полномочий в отношении количества и качества воды является то, что причины и, следовательно, пути решения проблем количества и качества воды зачастую взаимозависимы. Например, если сток в речной системе снижается по причине природной изменчивости, может наблюдаться дефицит воды для удовлетворения потребностей в ней или ассимиляции отходов, сбрасываемых в реку. В связи с этим могут быть построены плотины и водохранилища, позволяющие удовлетворить потребности в воде, увеличить сток в сухой сезон и тем самым добиться соответствия стандартам качества воды. Для достижения оптимальности конструкции таких плотин и водохранилищ потребности в количестве и качестве воды должны либо рассматриваться одновременно, либо быть интегрированы в процессе управления.

3.3.2

Поверхностные и грунтовые воды

Во многих регионах мира грунтовые воды являются главным источником питания поверхностных водотоков в течение сухого сезона. Кроме того, некоторые виды деятельности на поверхности земли, например, вызывающие утечки из подземных хранилищ, могут приводить к загрязнению водоносных горизонтов. При других видах деятельности на поверхности, например при изъятии части стока для городского или сельскохозяйственного водоснабжения, превышает скорость восполнения подземных вод, что также может привести к истощению ресурсов подземных вод.

Учитывая взаимосвязи, установленные выше, для достижения эффективного управления водными системами, необходимо изучать и рационально использовать поверхностные и подземные воды как взаимосвязанные системы, особенно для обеспечения надёжного снабжения водой приемлемого качества. Комплексный подход поощряет или даже требует совместного управления системами поверхностных и подземных вод.

3.3.3 **Рассмотрение вопросов взаимодействия стока выше и ниже по течению**

Решения или действия, принятые в верховьях речного бассейна или водосбора, имеют последствия для участков, расположенных ниже по течению. Например, точечное и неточечное загрязнение, попадающее в реку в верхних частях водосбора, может отрицательно сказаться на здоровье или оказать другое негативное воздействие на потребителей воды ниже по течению — людей или представителей иных биологических видов. И наоборот, если администрация населённых пунктов, расположенных ниже по течению, решает, что их уязвимость по отношению к наводнениям можно снизить путём строительства плотины и водохранилища выше по течению, могут пострадать жители территорий, расположенных выше по течению. Это происходит вследствие затопления городских и сельскохозяйственных земель в результате подпора, образуемого плотиной водохранилища, что приводит к потере жилья и средств к существованию большей части фермеров, а иногда к ущербу или даже потере мест культурно-исторического наследия, таких как места захоронений или исторические памятники.

На взаимосвязь между отдельными частями бассейна или водосбора часто ссылаются как на причину, вынуждающую использовать бассейн или водосбор как пространственную единицу комплексного управления водными ресурсами. Этот принцип вполне логичен. Однако стоит понимать, что рассматриваемый поверхностный водосбор может не совпадать с положением в пространстве водоносного горизонта. Никогда не стоит полагать, что системы поверхностных и подземных вод географически совпадают. Возможность подобного несоответствия границ гидрологических систем на поверхности земли и в ее недрах создает проблему для специалистов в области водных ресурсов, и очевидного решения этой проблемы не существует. Другой проблемой является межбассейновое перераспределение воды, которая требует более широкого охвата вопросов, чем рассмотрение внутрибассейнового водообмена между территориями, расположенными выше и ниже по течению; необходимо рассматривать взаимосвязи между двумя или более речными бассейнами.

Ещё одна проблема для определения пространственных границ управляемой системы на основе свойств экосистем заключается в присутствии административных и политических границ. Реки, и иногда озёра, раньше использовались для отображения границ между муниципалитетами, провинциями, штатами и странами и теперь принадлежат нескольким странам или административным единицам внутри страны. В результате управление такими реками и озёрами

требует участия и сотрудничества различных партнёров. Самым ярким примером является река Дунай, чей бассейн разделён между 19 странами. Обеспечение того, что интересы и проблемы участков выше и ниже по течению соблюдаются в ситуациях с участием разных стран, является значительной проблемой для реализации комплексного подхода.

3.3.4 **Водные, земельные и другие системы ресурсов**

Многие проблемы с водой возникают на земле. Для снижения ущерба от паводков, например, обычно недостаточно управлять или контролировать изменчивость уровней воды в реках посредством дамбы, запруд и плотин. Землепользование, относящееся к развитию городов или сельскому хозяйству, может привести к уменьшению или сокращению заболоченных территорий, лесных массивов и пастбищ, что, в свою очередь, усиливает эрозию и приводит к проблемам затопления. Действительно, считается, что большой ущерб от паводков вдоль рек Ганг в Индии и Инд в Пакистане можно приписать вырубке лесов в Гималаях. Более того, первый шаг к улучшению качества воды часто должен начинаться с уделения внимания деятельности, связанной с другими системами природных ресурсов. Так, например, использование пестицидов, гербицидов и удобрений для повышения продуктивности сельского хозяйства часто является главной причиной появления неточечных источников загрязнений; таким образом, для устранения загрязнения гидрологических систем необходимо обратиться к деятельности на поверхности земли.

Другой проблемой является перенос загрязняющих атмосферу веществ на большие расстояния. Даже если руководителями применяется комплексный подход в пределах бассейна, они, как правило, никак не могут влиять на источники загрязнения, находящиеся иногда за сотни километров от него.

3.3.5 **Окружающая среда, экономика и общество**

Исторически в развитых и развивающихся странах управление водными ресурсами осуществлялось представителями трёх профессий — инженерами, работниками сельского хозяйства и здравоохранения. Благодаря этому инженеры начали сосредотачивать свое внимание на конструктивных решениях проблем, начиная от безопасности воды — как для городского, так и для промышленного и сельскохозяйственного использования, — и заканчивая качеством воды и ущербом от паводков. Кроме того, внимание специалистов в области здравоохранения начали привлекать проблемы обработки и устранения сточных вод и других отходов, вредных для здоровья.

Доминирование в управлении водными ресурсами профессионалов из инженерных областей и областей здравоохранения придало особое значение техническим и экономическим перспективам. В течение 1960-х гг. росло понимание того факта, что вопросы охраны окружающей среды заслуживают большего внимания. Затем последовало признание того, что социальные и культурные проблемы также требуют специального рассмотрения. Это привело к признанию желаемого состава команды — по крайней мере, многодисциплинарной, а лучше междисциплинарной — для выработки совокупности профессиональных и дисциплинарных взглядов на разработку управленческих подходов. Поскольку каждая дисциплина, представленная в многодисциплинарной команде, дает результаты, относящиеся к конкретной дисциплине, и оставляет интеграцию этих результатов третьей стороне, создание эффективной команды требует преодоления многих препятствий и проблем. Для разработки и применения новых знаний членам команды необходимо работать вместе как равнозаинтересованным сторонам, сталкивающимся с общей задачей. При этом подобные команды необходимы, если целью является комплексное исследование социальных и экономических аспектов, а также вопросов окружающей среды.

3.3.6 **Вертикальная и горизонтальная фрагментация: обычные и цилиндрические управленческие системы**

Несмотря на веские основания для применения комплексного управления водными ресурсами, у государственных учреждений существуют прагматические причины сконцентрироваться на одной системе или на подмножестве систем ресурсов. Поэтому часто можно обнаружить автономные департаменты или министерства сельского хозяйства, лесного хозяйства, живой природы и природных ресурсов. Разделение функций между разными учреждениями известно как горизонтальная фрагментация, когда для данного уровня органов государственного управления — национального, областного или местного — ответственность за определенный вид ресурсов поручается различным учреждениям. Такие меры требуют ряда технических экспертных оценок, представленных в команде, которая может концентрироваться на проблемах и возможностях данного вида ресурсов и, где уместно, установить рабочие отношения с его потребителями. Наряду с такими организационными структурами могут использоваться межведомственные комитеты или целевые группы, позволяющие координировать различные интересы, полномочия и перспективы.

В условиях отсутствия координации и сотрудничества возникает реальная опасность снижения эффективности и результативности. Например, в случаях когда

министерство сельского хозяйства выполняет свои обязанности по увеличению низкочувствительного производства продуктов питания, оно может принять решение осушить болотистую местность, чтобы ввести в сельскохозяйственный оборот больше земли, или поощрять использование удобрений или других химикатов для повышения урожайности сельскохозяйственных культур. В отличие от этого министерство природных ресурсов может ввести в действие программы, направленные на защиту или расширение водно-болотных угодий для увеличения ареала обитания диких животных или принять меры по замедлению стока, порождаемого штормовыми осадками, и за счёт этого уменьшить затопление территорий, расположенных ниже по течению. Такие программы могут также препятствовать применению химикатов с целью уменьшения загрязнения водного пространства, используемого рыбой, птицами и другими биологическими видами. Действия упомянутых министерств могут не привести в результате к изменению общего числа или качества находящихся под их юрисдикцией водно-болотных угодий, однако будут израсходованы значительные средства для осушения болотистых земель в одном месте и для их увеличения в другом.

Как было упомянуто выше, горизонтальная фрагментация управления соответствует разделению ответственности в пределах одного уровня или слоя органов государственного управления. Вертикальная фрагментация имеет место, когда учреждения разных уровней государственного управления — национального, областного или местного — разделяют общий интерес или ответственность за отдельный вид ресурсов, например, воду. Областной орган может, к примеру, спроектировать, построить и эксплуатировать плотину и водохранилище, одной из целей которых является снабжение водой близлежащих населенных пунктов. В то же самое время местный орган власти может отвечать за доставку воды из водохранилища к домам, промышленным и сельскохозяйственным системам ирригации. В подобных ситуациях существует реальная потребность в механизмах или процедурах координации полномочий и действий между органами управления различных уровней. Вертикальная и горизонтальная фрагментация могут создавать препятствия для комплексного управления водными ресурсами; в силу этого жизненно необходима интеграция.

Одним из возможных способов преодоления подобной фрагментации является упразднение учреждений, ориентированных на один ресурс, и создание ведомств с более широкими функциями, таких как министерства окружающей среды или устойчивого развития. Это было сделано федеральным правительством Канады, которое упразднило свое Управление внутренних водных ресурсов и перераспределило сотрудников между различными отделами Министерства по охране

окружающей среды Канады. Целью было добиться уверенности, что вода рассматривается наравне с другими природными ресурсами, что необходимо для достижения устойчивого развития. Теоретически это было разумно. С другой стороны, вскоре стало ясно, что специалистам других федеральных учреждений и потребителям стало весьма затруднительно выискивать специалистов в области водных ресурсов с тем, чтобы ставить свои вопросы. Кроме того, стало ясно, что большая часть земледельцев или других водопользователей скорее думали о существующей проблеме с водой или отходами, нежели о проблеме устойчивого развития.

Концепции вертикальной и горизонтальной фрагментации показывают, что менеджеры в области водных и других ресурсов сталкиваются с наибольшими трудностями в решении так называемых пограничных или краевых задач — тех, что находятся в области полномочий или под ответственностью двух или более учреждений, и потому должны рассматриваться совместно. Учреждения, как правило, очень компетентно занимаются проблемами и задачами, которые находятся четко в рамках их полномочий. В то же время при решении пограничных задач они сталкиваются с серьезными проблемами и поэтому требуют комплексного подхода, несмотря на практические административные проблемы, которые необходимо преодолевать.

3.3.7 **Сотрудничество, координация и согласованность**

Какие критерии должны быть использованы для оценки успеха конкретного подхода к управлению? Обычно применяются следующие критерии: эффективность с точки зрения достижения ожидаемых результатов или выходной продукции, результативность в связи с достижением ожидаемого результата без потери времени и энергии и справедливость — обеспечение справедливого распределения выгод от желаемых результатов и затрат на их достижение. В предыдущих разделах показано, что многие аспекты могут препятствовать эффективности, результативности и справедливости.

Комплексное управление водными ресурсами является инструментом, который может помочь руководителям удовлетворять таким критериям. Для достижения интеграции необходимы следующие факторы: сотрудничество или совместная работа; координация, т. е. гармоничное регулирование или совместная работа или распределение деятельности в надлежащем порядке; взаимоотношения и согласованность, т. е. логические связи или последовательность, гармоничное соединение частей единого целого.

Интеграция является средством для достижения цели, а не самоцелью. В результате использованию

интеграции в управлении водными ресурсами должно предшествовать общее видение желаемого будущего условия или состояния. Без такой установки трудно определить, какие части необходимо объединить, кто должен работать вместе для установления надлежащего порядка и деловых взаимоотношений, и какие логические связи должны быть построены.

Обоснованием для интеграции как одного из инструментов, помогающего в достижении видения проблемы, является возможность достигнуть желаемого будущего состояния действительно, эффективно и справедливо. Интеграцию обычно поддерживают из-за её потенциального вклада по всем трем критериям. Она способствует результативности, поскольку различные потребности и возможности учитываются и включаются в планы и виды деятельности; эффективности, поскольку действия одного учреждения или организации не отменяют действия другого учреждения, а также справедливости, поскольку она заставляет рассматривать разные принципы и интересы различных заинтересованных сторон.

3.4 **ЭВОЛЮЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ**

Комплексное управление водными ресурсами не является новой концепцией. Оно существовало в той или иной форме на протяжении более полувека в устных и письменных высказываниях видных специалистов в области водных ресурсов, таких как Гилберт Уайт. Эта концепция была признана Конференцией ООН по водным ресурсам, состоявшейся в Мар-дель-Плате в 1977 г., посредством принятия резолюции. Позже, комплексное управление водными ресурсами было признано в качестве руководящего принципа в Дублинском заявлении о водных ресурсах и устойчивом развитии 1992 г. (ICWE, 1992). Совсем недавно программа Глобального водного партнерства была основана на этой концепции (Tortajada, 2003). В различных странах и регионах были предприняты инициативы по использованию водных ресурсов на основе концепции комплексного управления водными ресурсами, даже если именно этот термин не был употреблен. В этом разделе рассматривается опыт работы с выбранными подходами к комплексному управлению водными ресурсами.

3.4.1 **Соединенные Штаты Америки: охраняемые природные территории Огайо, Управление ресурсами бассейна реки Теннесси**

Управление ресурсами бассейна реки Теннесси было создано в 1933 г. с целью осуществления интегрированным

и скоординированным образом проектов, связанных с развитием гидроэнергетики, судоходства и борьбы с паводками в бассейне реки Теннесси. Без этого Управления различные учреждения, ответственные за электроснабжение, навигацию и борьбу с паводками, скорее всего, работали бы изолированно и, таким образом, упускали бы благоприятную возможность дополнения друг друга при планировании и осуществлении своей деятельности. Кроме того, Управление ресурсами бассейна реки Теннесси стало принимать участие в реализации других проектов, таких как планирование сельской местности, жилищное строительство, здравоохранение, библиотеки и организация отдыха, поскольку ранее не существовало учреждений, предоставлявших обслуживание подобного рода.

3.4.2 Канада: природоохранные органы власти

В 1946 г. в Онтарио был принят закон, направленный на создание природоохранных органов власти — организаций по управлению речными водосборами, сформированных на основе сотрудничества муниципальных образований с исполнительными органами провинций (Richardson, 1974; Mitchell and Shrubsole, 1992). Причиной было понимание того, что отдельные муниципалитеты не имеют ресурсов или полномочий на принятие таких решений, как строительство и эксплуатация плотин и водохранилищ выше по течению для защиты от паводков, что могло бы принести пользу отдельному муниципальному образованию, а также другим поселениям, расположенным ниже по течению. В 2005 г. в штате Онтарио было 36 природоохранных органов власти, охватывающих территории, на которых проживало более 90 процентов населения.

Деятельность природоохранных органов власти была основана на следующих принципах, которые имеют непреходящую ценность:

- a) лучшим единичным элементом управления является водосборный бассейн: многие виды экономической деятельности провинции, например сельское и лесное хозяйство, зависят от водных и земельных ресурсов, что подчеркивает необходимость применения интегрированного подхода;
- b) большое значение имеет местная инициатива: управление по охране природы может быть организовано только тогда, когда два или более муниципальных образования, расположенных на одном и том же водосборном бассейне, согласятся сотрудничать друг с другом и органом исполнительной власти провинции;
- c) провинциально-муниципальное партнерство имеет ключевое значение: исполнительные органы провинций не будут диктовать условия природоохранным органам, а будут участвовать в качестве партнеров. Однако это также означает, что районы

с небольшим населением или скромными налоговыми поступлениями не смогут сформировать управление по охране природы, поскольку местного потенциала будет недостаточно для мобилизации необходимых средств;

- d) необходим всеобъемлющий подход: многие проблемы в области землепользования вызваны слишком большим или слишком малым количеством воды, и проблемы, связанные с водой, часто находятся под влиянием землепользования. Таким образом, необходимо применять интегрированный подход, а это означает, что водные и земельные ресурсы следует рассматривать во взаимосвязи;
- e) координация и сотрудничество имеют большое значение: любому новому природоохранному органу власти необходимо налаживать связи с провинциальными и муниципальными учреждениями, отвечающими за другие природные ресурсы, окружающую среду и планирование природопользования.

3.4.3 США и Канада: Великие озера

Бассейн Великих озер, разделённый между США и Канадой, охватывает площадь до стока из озера Онтарио 765 990 км², 521 830 км² которых заняты сушей и 244 160 км² — водой. Он содержит около 20 процентов мировых запасов поверхностной пресной воды и является местом обитания более чем 40 миллионов человек — 14 процентов от общей численности населения США и 30 процентов от общего населения Канады. Его система общего управления включает в себя два национальных, восемь в отдельных штатах, два провинциальных и сотни муниципальных органов власти.

В 1909 году два национальных правительства подписали Договор о пограничных водах и с помощью этого договора создали Международную совместную комиссию. В неё входят шесть комиссаров: три из США и три из Канады. Она является постоянным двусторонним органом и форумом для международного сотрудничества и разрешения конфликтов в отношении загрязнения воздуха, качества воды, регулирования уровня воды и режима водотоков, расположенных между Канадой и Соединенными Штатами Америки вдоль их общей границы. Эта Комиссия играет квазисудебные, следственные и наблюдательные роли и имеет два оперативных подразделения — Совет по качеству воды Великих озер и Научно-консультативный совет Великих озер. Комиссией были составлены два важных документа — соглашения по качеству воды Великих озер 1972 и 1978 гг. с поправками, принятыми в 1987 г. Соглашение 1978 г. стало катализатором для применения экосистемного подхода.

3.4.4 **Австралия: общее управление водными и земельными ресурсами водосборного бассейна**

Заслуги при разработке общего управления ресурсами речного бассейна в Австралии принадлежат Бертону (Burton, 1986). В 1947 г. правительство штата Новый Южный Уэльс образовало Министерство охраны природы для координации управления водными, земельными и лесными ресурсами в государстве. В 1950 г. было принято законодательство для создания Природоохранного фонда долины реки Хантер, отвечающего за совместное управление водными и земельными ресурсами в этой долине, расположенной вдали от Ньюкасла на побережье Нового Южного Уэльса. В 1984 г. премьер-министр штата одобрил создание Межведомственного комитета по общему управлению водосбором на общегосударственном уровне, а затем объявил, что план по общему управлению водосбора будет разработан для всех основных речных долин в Новом Южном Уэльсе.

3.4.5 **Новая Зеландия: закон об управлении ресурсами**

Опыт Новой Зеландии в комплексном управлении водными ресурсами восходит к 1940-м гг. (Мемон, 2000). Позже, начиная с 1960-х гг., были начаты разработки планов по контролю водосборов в отношении охраны почв и регулирования стока, реализация которых была продолжена в 1970-х гг. путем проведения общесборного учёта ресурсов и создания неформальных планов распределения воды.

Закон об управлении ресурсами 1991 г. был важной вехой, отличавшейся предоставлением «нормативных основ для относительно комплексного подхода к экологическому планированию» (Мемон, 2000). Кроме того, закон заменил большое количество отдельных и иногда непоследовательных и перекрывающих друг друга законов, связанных с использованием земельных, водных, воздушных и геотермальных ресурсов. В соответствии с этим законом обязанности распределены между тремя уровнями. Центральное правительство сосредотачивает свое внимание на вопросах политики и мониторинга. Задачи рационального использования водных и других ресурсов, а также экологического управления на субнациональном уровне решаются в рамках двухуровневой системы, включающей непосредственно избранные многоцелевые региональные советы и местные органы — городские и районные советы. Было учреждено 12 региональных советов по числу водосборных бассейнов крупных рек.

3.4.6 **Южная Африка**

Закон о воде 1956 г. был принят для обеспечения справедливого распределения воды между конкурирующими сельскохозяйственными и промышленными нуждами. Одним из ключевых аспектов законодательства было предоставление права на воду владельцам прибрежной собственности, предоставив им право для удержания воды посредством плотин и других средств. К середине 1990-х гг. было признано, что в 1956 г. у закона были некоторые серьезные ограничения. Во-первых, проблемы качества воды не были систематически учтены в управленческих решениях, которые обычно подчеркивали распределение объемов воды. Одним из результатов был рост загрязнения органическими веществами и эвтрофикации. Во-вторых, потребности в воде для окружающей среды не были адекватно признаны. В-третьих, по крайней мере, во многих сельских районах доступ к воде рассматривался как несправедливый. Наконец, в ходе выполнения ряда анализов в 1990-х гг. была отмечена необходимость более интегрированного подхода к управлению водными ресурсами (Department of Water Affairs and Forestry and Water Resources Commission, 1996; Lazarus, 1997; Gorgens and others, 1998). Результатом стал документ под названием Paper on a National Water Policy for South Africa (Белая книга по национальной водной политике Южной Африки), подготовка которого началась в 1995 г. с консультаций, которые продолжались более двух лет (Department of Water Affairs and Forestry, 1997).

В 1997 г. Южная Африка ввела в действие новый закон о водоснабжении, а в 1998 г. — национальный закон о воде с целью изменить подход, с применением которого осуществлялось управление водным хозяйством. Ключевым аспектом нового подхода было внедрение комплексного управления водными ресурсами. Национальный закон о воде признает, что водных ресурсов недостаточно, и они являются неравномерно распределяемым национальным ресурсом, который принадлежит всему народу, а не только прибрежным землевладельцам. Устойчивость и справедливость были определены в качестве основополагающих принципов, и одной из ключевых задач стало удовлетворение основных потребностей современного и будущих поколений, наряду с защитой окружающей среды и выполнением международных обязательств по совместному использованию водных ресурсов. Социально-экономическое развитие также должно стимулироваться через распределение и использование воды.

Национальный закон о воде придает особое значение децентрализации. В состав ключевых новых учреждений входят агентства управления речными бассейнами, с помощью которых ответственность за

рациональное использование водных ресурсов делегируется на региональный уровень или уровень водосбора и в управление вовлекаются местные общины. Каждое агентство по управлению речным бассейном несет ответственность за стратегию управления водосбором, с помощью которой агентство имеет полномочия обеспечивать управление, мониторинг, охрану и защиту водных ресурсов, а также устанавливать правила по регулированию использования воды, требовать создание систем управления и контроля, временно ограничивать или запрещать использование воды в периоды нехватки воды. Ассоциации водопользователей также создаются в соответствии с законодательством для оказания помощи и координации действий отдельных пользователей воды.

Опираясь на опыт, накопленный в Южной Африке, Ван Зил (1999 г.) сделал вывод о том, что успешное использование комплексного управления водными ресурсами требует признания того, что комплексное управление водными ресурсами имеет следующие характерные особенности:

- a) это общее командное дело. Командный подход требует взаимопонимания, личной и командной готовности и навыков, норм и правил для ведения дел и правильной организации. Оно также требует тренировки, координации, линии поведения, комплексных стратегий и планирования;
- b) суть — в победе и достижении целей. Это требует приверженности и страсти к ведению дел, индивидуальной и командной мотивации, духа коллектива и взаимного доверия и уважения к проекту, команде и сторонникам;
- c) суть — в лучшей стратегии. Это требует понимания реального бизнеса, привлечения нужных игроков и чемпионов, обращения к системам ценностей, тактической организации, предпринимательства, отсутствия понятия о границах, инноваций и создания культуры победителей;
- d) суть — в чемпионах, людях с предвидением, инициативой, страстью и выдающимися лидерскими способностями;
- e) это упражнение в области общественного управления и политологии. Должна быть поддержка программы, или же она не будет выполнена.

Перечисленное выше актуально и за пределами Южной Африки и заслуживает внимания при проектировании, создании и осуществлении комплексных стратегий управления водными ресурсами.

3.5

ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

3.5.1

Дублинская конференция: Встреча на высшем уровне «Планета Земля», 1992 г.

В преддверии Конференции Организации Объединенных Наций по окружающей среде и развитию, состоявшейся в Рио-де-Жанейро в июне 1992 г. и известной как Встреча на высшем уровне «Планета Земля», в январе 1992 г. в Дублине (Ирландия) была проведена Международная конференция по водным ресурсам и окружающей среде. Она была создана ВМО от имени всех государств, заинтересованных в ресурсах пресной воды. Эта Конференция стала самым всеобъемлющим мероприятием, посвященным глобальным проблемам, связанным с водой, со времени Конференции ООН по водным ресурсам, состоявшейся в марте 1977 г. в Мар-дель-Плате (Аргентина). Цель Дублинской конференции заключалась в определении приоритетных вопросов, связанных с пресной водой, и в принятии рекомендаций по мерам для их решения (ICWE, 1992). Идеи и предложения Дублинской конференции были представлены на Встрече на высшем уровне «Планета Земля», а многие рекомендации были впоследствии включены в Повестку дня на XXI век, являющуюся стратегией устойчивого развития в двадцать первом веке (Young and others, 1994).

Основным результатом конференции стало Дублинское заявление о водных ресурсах и устойчивом развитии, которое было сформулировано по итогам дискуссий, в которых приняли участие более 500 человек из 114 стран, 28 учреждений Организации Объединенных Наций и 58 неправительственных и межправительственных организаций. В преамбуле Дублинского заявления утверждается, что согласованные действия необходимы, чтобы обратить вспять тенденции чрезмерного потребления воды, загрязнения окружающей среды и роста угроз паводков и засух. Действия должны предприниматься на местном, национальном и международном уровнях, а четыре приведенных ниже принципа должны стать руководящими для будущих программ действий. Первый принцип был интерпретирован как призыв к комплексному управлению водными ресурсами.

Пресная вода — истощимый и уязвимый ресурс, имеющий важнейшее значение для поддержания жизни, развития и окружающей среды. Поскольку вода поддерживает жизнь, эффективное управление водными ресурсами требует целостного подхода, тесной связи между социально-экономическим развитием и охраной природных экосистем. Эффективное управление связывает использование наземных и водных ресурсов на всей территории площади водосбора или подземных водоносных горизонтов.

Другие принципы подчеркивают необходимость следующих мер:

- a) подход, предусматривающий совместное участие пользователей, планирующих органов и директивных органов на всех уровнях, при этом решения принимаются на самом низком соответствующем уровне;
- b) усиление роли женщин в обеспечении, управлении и сбережении воды;
- c) признание того, что вода имеет экономическую стоимость во всех конкурирующих видах использования, и, следовательно, должна также рассматриваться как экономическое благо. Управление водными ресурсами в качестве экономического блага рассматривается как важное средство для достижения эффективного и справедливого использования, а также для поддержки сбережения и охраны водных ресурсов. Кроме того, все люди имеют право на доступ к чистой воде и средствам санитарии по доступной цене.

Первый принцип Дублинского заявления — требование целостного подхода (который, начиная со Встречи на высшем уровне «Планета Земля», обычно назывался комплексным подходом) — привлек наибольшее внимание. Он подчеркнул, что водные проблемы не могут рассматриваться отдельно от других, и в действительности должны быть рассмотрены в связи с землепользованием и связанными с ним вопросами планирования. Этот принцип не был революционным, поскольку Организация экономического сотрудничества и развития (1989 г.) ранее опубликовала руководящие принципы по интеграции в области управления водными ресурсами. Впоследствии такие исследователи, как Маккензи (MacKenzie, 1996), призвали к принятию экосистемного [целостного] подхода, отметив, что его «можно рассматривать как всеобъемлющий (по сфере применения), так и как комплексный (по содержанию)».

Повестка дня на XXI век была главным итогом Встречи на высшем уровне «Планета Земля» (United Nations, 1992). В главе 18 Повестки дня рассматриваются ресурсы пресной воды и предоставляются убедительные доводы в пользу комплексного управления водными ресурсами:

...целостное управление пресной водой, как исчерпаемым и уязвимым ресурсом, и интеграция отраслевых водохозяйственных планов и программ в рамках национальной социально-экономической политики имеют первостепенное значение для хозяйственно-экономической деятельности, начиная с 1990-х гг. и в последующие годы. Фрагментация ответственности за освоение водных ресурсов между секторальными учреждениями оказывается, однако, еще большим препятствием для стимуляции комплексного управления водными ресурсами, чем ожидалось.

В этой оценке Повестка дня на XXI век выдвигает на первый план проблемы краевых и пограничных задач, отмеченные ранее, а также значимость вертикальной и горизонтальной фрагментации управления.

3.5.2 **Всемирный совет по водным проблемам и всемирные форумы по водным проблемам**

Всемирный совет по водным проблемам был создан в 1996 г., чтобы стать открытой платформой для обсуждения проблем, связанных с водой. Подробную информацию о Совете можно найти на его веб-сайте <http://www.worldwatercouncil.org/>.

Совет был создан по инициативе специалистов водного хозяйства, научного сообщества и международных агентств. Он регулярно проводит всемирные форумы по водным проблемам в целях обсуждения вопросов, связанных с водой, разработки практических предложений и придания большого значения проблемам водных ресурсов. Первый Всемирный форум по водным проблемам состоялся в Марракеше (Марокко) в марте 1997 г., второй — в Гааге (Нидерланды) в марте 2000 г., третий — в Токио (Япония) в марте 2003 г. и четвертый — в Мехико (Мексика) в марте 2006 г. Пятый Всемирный форум по водным проблемам запланировано провести в Стамбуле (Турция) в марте 2009 г.

Всемирные форумы по водным проблемам последовательно поддерживают концепцию комплексного управления водными ресурсами. Например, Гагская министерская декларация по водной безопасности в XXI веке гласит следующим образом:

Действия, которые отстаиваются здесь, основываются на принципе комплексного управления водными ресурсами, который включает в себя планирование управления водных ресурсов (как обычного, так и нетрадиционного) и земельных угодий. Он учитывает социальные, экономические и экологические факторы и интегрирует поверхностные воды, подземные воды и экосистемы, через которые они текут, и подчеркивает важность вопросов качества воды.

В Министерской декларации, принятой на Третьем Всемирном форуме по водным проблемам в Японии, также отмечается важность комплексного управления водными ресурсами:

В то время как предпринимаются и укрепляются усилия, принятые до настоящего времени в отношении освоения водных ресурсов и управления ими, мы признаем, что благое управление, наращивание потенциала и финансирование имеют первостепенное значение для успеха наших усилий. В этом контексте мы будем содействовать комплексному управлению водными ресурсами.

3.5.3 Глобальное водное партнерство

Глобальное водное партнерство было создано в 1996 г. — в тот же самый год, когда был создан Всемирный совет по водным проблемам. Подробную информацию можно найти на сайте <http://www.worldwatercouncil.org/>.

Партнерство представляет собой международную сеть, функционирующую при поддержке ряда стран и международных финансовых учреждений. Его мандат заключается в оказании поддержки интегрированным подходам к устойчивому управлению водными ресурсами в соответствии с принципами, провозглашенными на форумах в Дублине и Рио-де-Жанейро путём поощрения сторон всех уровней, заинтересованных в более эффективной, действенной и совместной работе. Его основная функция заключается в содействии обмену информацией и, весьма очевидно, в содействии комплексному управлению водными ресурсами. Как международная сеть оно открыто для всех органов, участвующих в управлении водными ресурсами — правительств развитых и развивающихся стран, учреждений Организации Объединенных Наций, многосторонних банков, профессиональных ассоциаций, научно-исследовательских институтов, частного сектора и неправительственных организаций.

Сеть Глобального водного партнерства включает секретариат в Стокгольме и девять технических консультативных комитетов для каждого из следующих регионов: Южной Африки, Западной Африки, Средиземноморья, Центральной и Восточной Европы, Центральной Америки, Южной Америки, Южной Азии, Юго-Восточной Азии и Китая.

3.5.4 Всемирная встреча на высшем уровне по устойчивому развитию (Йоханнесбург, 2002 г.)

Всемирная встреча на высшем уровне по устойчивому развитию была проведена через десять лет после Встречи на высшем уровне «Планета Земля» в Рио-де-Жанейро. На ней был подготовлен план по осуществлению, направленный на развитие и расширение мер, предложенных в Повестке дня на XXI век. В разделе IV Плана рассматриваются вопросы, связанные с охраной и рациональным использованием природоресурсной базы экономического и социального развития, а первой рассмотренной темой этого Плана был интегрированный подход к ее управлению.

Что касается интегрированного подхода, План предусматривает следующее:

Деятельность человека оказывает все большее воздействие на целостность экосистем, которые обеспечивают необходимые ресурсы и средства обеспечения для благосостояния человека и хозяйственной деятельности. Управление природными ресурсами на устойчивой и комплексной основе имеет первостепенное значение для устойчивого развития. В этой связи, чтобы как можно скорее обратить вспять нынешнюю тенденцию к деградации природных ресурсов, необходимо реализовать стратегии, которые должны включать задачи (утвержденные на национальном и, при необходимости, на региональном уровнях) по защите экосистем и достижению интегрированного управления земельными, водными и биологическими ресурсами, при одновременном укреплении управленческого потенциала на региональном, национальном и местном уровне.

Что касается ресурсов пресной воды, в Плате заявлено, что цель должна заключаться в развитии к 2005 г. комплексного управления водными ресурсами и разработке планов по повышению его эффективности при оказании поддержки развивающимся странам посредством действий на всех уровнях с тем, чтобы «разработать и осуществить национальные/региональные стратегии, планы и программы относительно комплексного управления речными бассейнами, водосборами и грунтовыми водами».

3.6 ЭЛЕМЕНТЫ ПЕРЕДОВОЙ ПРАКТИКИ В ОБЛАСТИ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

3.6.1 Альтернативные интерпретации: всеобъемлющий подход по отношению к комплексному подходу

В начале данной главы термин «комплексный» был определен как «объединяющий все части в одно гармоничное целое или координирующий различные элементы». Это определение привело к введению понятия комплексного управления водными ресурсами, которое характеризуется как системный, экосистемный, целостный и всеобъемлющий подход. Однако акцент на том, что все части объединены в единое целое, также является главной проблемой комплексного управления водными ресурсами и его важнейшей задачей.

На уровне стратегического планирования необходимо толковать комплексное управление водными ресурсами как всеобъемлющий подход, направленный на выявление и рассмотрение широкого числа переменных

факторов, которые являются существенными для скоординированного управления водными ресурсами и другими связанными с ними земельными и природными ресурсами. Вместе с тем, если интерпретации поддерживаются на оперативном уровне, то, как показывает опыт, это способствует чрезмерно длительным периодам времени, необходимым для планирования; кроме того, это сказывается на планах, которые в этом случае, как правило, становятся недостаточно сконцентрированными с тем, чтобы иметь значение для руководителей.

Принимая во внимание вышеупомянутые проблемы, в целях обеспечения поддержания наиболее широких перспектив на уровне стратегического планирования должен применяться всеобъемлющий подход, во избежание пропуска какого-либо ключевого внешнего или внутреннего переменного фактора или их соотношений. Однако на оперативном уровне необходимо уделять больше внимания конкретным вопросам. В этой связи комплексный подход, уделяя при этом внимание к системам, переменным факторам и их взаимосвязям, несет избирательный и более целенаправленный характер. Он концентрируется на подмножестве переменных и отношений, которые оцениваются как наиболее важные и поддаются влиянию со стороны руководства. Если установить такое различие между всеобъемлющей и комплексной интерпретацией системы, экосистемы или целостного подхода, возможно завершить планирование в более реальные сроки, определить наиболее важные приоритеты для действий и таким образом удовлетворить потребности специалистов по управлению и пользователей (Mitchell, 1990).

3.6.2 Видение ожидаемого будущего

Комплексное управление водными ресурсами является средством достижения цели, а не самоцелью. Следовательно, перед началом его осуществления или в качестве первого шага в этом процессе, важно иметь хорошо налаженное перспективное видение или направление ожидаемого будущего состояния для области или водосбора. Комплексное управление водными ресурсами будет одним из инструментов для его достижения.

Видение определяет направление, к которому группа или общество соглашается идти. Видение представляет будущее, которое существенным образом лучше или более желательно, чем настоящее. Без такого курса направления деятельности трудно определить, какие части должны быть объединены в единое целое и кто должен работать сообща, чтобы навести надлежащий порядок и установить взаимоотношения.

Разработка общего видения может быть серьезной проблемой, поскольку в любой момент времени между различными заинтересованными группами в бассейне реки или водосборе будет существовать спектр ценностей, интересов и потребностей. Однако если нет чувства курса деятельности или четко определенных целей, то организовать комплексное управление водными ресурсами невозможно. Таким образом, специалисты по планированию и управлению должны понимать, что без перспективного видения маловероятно, что комплексное управление водными ресурсами станет эффективным инструментом. Даже хуже, концепция комплексного управления может быть дискредитирована, поскольку не было сформировано видение — того, чего никогда не планировалось делать.

Думая о видении перспективы, полезно различать, что является наиболее вероятным, желательным и возможным. Специалисты по планированию и управлению зачастую в первую очередь сосредотачивают внимание на выявлении наиболее вероятного будущего, и взгляд на это представляет большую ценность. Однако слишком часто они останавливаются на этом или переходят непосредственно к рассмотрению, что будет возможным будущим, в свете того, что считается наиболее вероятным. Важно помнить, что наиболее вероятное будущее может не быть наиболее желательным будущим, именно поэтому специалисты по планированию и управлению стремятся выработать видение — чтобы определить ожидаемое будущее состояние.

3.6.3 **Пространственный масштаб: водосбор, частный водосбор, приток и экологическая зона**

Важно провести различие между различными ситуациями при применении комплексного управления водными ресурсами. Необходимо регулировать количество включенных элементов, поскольку изменения в пространственном масштабе особенно значительны. В отчете, посвященном извлеченным урокам и передовой практике, связанной с управлением водосборами, три природоохранных управления штата Онтарио (2002 г.) опубликовали некоторые аналитические наработки.

В штате Онтарио планирование использования водных и земельных ресурсов водосборного бассейна, эквивалентное комплексному управлению водными ресурсами, ведется на четырех различных уровнях, в соответствии «с уровнем детализации, увеличивающимся с уменьшением размера зоны планирования». В этой связи наиболее логичным и эффективным способом для проведения комплексного управления водными ресурсами было бы начать с подготовки плана для водосбора или бассейна реки и затем разрабатывать

планы для меньших водосборов или бассейнов на приоритетной основе, а затем — планы притоков и, наконец, по мере необходимости, экологические планы конкретных участков. Основные извлеченные выводы показывают: то, что делается на каждом этапе, обеспечивает направление деятельности и информацию для последующего, более низкого уровня, а также помогает избежать или свести к минимуму возможности дублирования.

С другой стороны, финансовые трудности зачастую приводят к тому, что планы для меньшего бассейна или водосбора готовятся раньше и интегрируются позже в общий план бассейна или водосбора для комплексного управления водными ресурсами. Аналогичным образом планы притоков могут быть завершены до завершения подготовки планов меньшего водосбора. Три канадских природоохранных управления различают четыре уровня комплексного управления водными ресурсами:

- a) планы развития бассейна или водосбора: такие планы охватывают большие территории. Эти планы включают в себя цели, задачи и показатели для всего бассейна и рассматривают как природные ресурсы, так и экологические проблемы. Они также обеспечивают политику и курс деятельности в масштабах всего речного бассейна в целях охраны поверхностных и подземных вод, природных объектов, рыболовства, систем открытых пространств, водной и наземной среды обитания, а также других важных особенностей;
- b) планы развития частного бассейна или частного водосбора: эти планы рассматривают меньшую площадь по сравнению с планами уровня бассейна или водосбора. Для этого пространственного масштаба обеспечивается повышенная детализация, что позволяет рассматривать локальные экологические проблемы. Определяются цели, задачи и показатели для управления частным водосбором. Планы частного бассейна или частного водосбора в русле комплексного управления водными ресурсами разрабатываются специально с учетом локальных условий и проблем. В дальнейшем полученные рекомендации могут быть включены в официальные планы, вторичные планы, управленческие планы роста или другие муниципальные инструменты планирования;
- c) планы развития отдельных притоков: планы такого масштаба обычно готовятся для формирования предложений по значительным изменениям землепользования, таким как предложения для нарезки земельных наделов, организация крупного водосбора, добыча гравия, интенсивное сельское хозяйство и развитие промышленных зон. Такие планы подготавливаются для отдельных фрагментов частного водосбора и обычно охватывают площадь от 2 до 10 км². В идеальном случае границы,

указанные в плане развития притока, должны совпадать с границами водосборного бассейна притока, но это не всегда возможно на практике. Рекомендации, вытекающие из планов развития притоков, обычно появляются во вторичных планах землепользования, поправках к официальным планам землепользования, условиях для утверждения проекта плана или для утверждения плана участка;

- d) планы развития экологической зоны: такие планы обычно разрабатываются с учетом условий, изложенных в проекте плана. Они предоставляют подробную информацию о предлагаемых экологических и ливневых измерениях и, как правило, представляются параллельно с планами по выравниванию участка, контролю эрозии или осадков или обслуживанию этого участка. Рекомендации, сформулированные в планах развития экологического участка, обычно появляются в эскизах проектов планов земельных наделов или промышленной недвижимости.

Указанные выше четыре масштаба или уровня заслуживают внимания всех специалистов по планированию и управлению, участвующих в комплексном управлении водными ресурсами. Зная о том, что различные уровни детализации соответствуют разным пространственным масштабам, специалисты по планированию и управлению могут повысить вероятность того, чтобы вопросы и проблемы решались на соответствующем уровне детализации. Можно будет избежать параллелизма и дублирования работы, а время, необходимое для завершения планов комплексного управления водными ресурсами, будет сокращено, и потенциал для их осуществления будет увеличен. Если все это будет реализовано, надёжность и ценность комплексного управления водными ресурсами возрастут.

3.6.4 Партнерства и союзы

Комплексное управление водными ресурсами было разработано для обеспечения целостного или экосистемного подхода, а также облегчения координации реализации инициатив различными заинтересованными сторонами. Что касается последнего, необходима сильная мотивация, чтобы переломить то, что часто называют «силосным эффектом» (или эффектом цилиндрической системы, который характеризуется стремлением учреждений принимать решения в отношении только их собственных сфер ответственности и полномочий, независимо от сфер ответственности и полномочий других организаций). Таким образом, имеются достаточные основания ожидать, что комплексное управление водными ресурсами будет более эффективным и действенным по сравнению с неинтегрированным подходом. Однако, оказывая содействие целостному подходу, комплексное управление

водными ресурсами может испытывать напряженность по отношению к мерам по включению совместных механизмов. Многие лица, общины или группы заинтересованных сторон не всегда уделяют внимание всей системе, а только ее части или аспекту, связанным с их собственными потребностями и интересами. Таким образом, люди часто фокусируются на воздействии управления водосбором на их собственность, а муниципальные власти часто беспокоятся о площади, за которую они ответственны. Таким образом, если комплексное управление водными ресурсами и методы, подразумевающие совместное участие, должны быть использованы вместе, необходимо заранее понять их сильные и слабые стороны.

Сотрудничество позволяет заинтересованным сторонам делиться мнениями по различным аспектам проблемы, а потом вместе исследовать различия и конструктивно искать решения, выходящие за рамки возможностей и ограничений каждой из заинтересованных сторон. Таким образом, они могут сообща использовать ресурсы, расширять их потенциал в интересах взаимной выгоды и достижения общей цели путем совместного распределения рисков, обязанностей и благ (Gray, 1989; Himmelman, 1996).

Кроме того, Гантон и Дэй (Gunton and Day, 2003) отмечают, что крайне важно определить, применим ли основанный на сотрудничестве подход в каждом конкретном случае. По их мнению, совместный подход «может не работать при любых обстоятельствах». Чтобы помочь определить, когда основанный на сотрудничестве подход уместен, они определили пять предпосылок для успеха:

- a) приверженность принимающих решения учреждений основанному на сотрудничестве подходу;
- b) обязательство всех участвующих сторон;
- c) настоятельная необходимость решения проблемы или проблем;
- d) отсутствие различий между фундаментальными ценностями партнеров;
- e) наличие реалистичных решений. С этой точки зрения проблема состоит не в том, все ли предварительные условия будут выполнены идеально, а в том, будут ли они выполнены достаточно адекватно для того, чтобы основанный на сотрудничестве процесс начался.

3.6.5 **Связь с региональным планированием и оценка воздействия**

Планам или стратегиям комплексного управления водными ресурсами во многих случаях не хватает законодательной или предусмотренной законом базы. Это может иметь ряд негативных последствий. Во-первых, учреждения, получающие рекомендации

согласно плану комплексного управления водными ресурсами, вправе просто игнорировать их, полагая, что они выходят за рамки их законодательного мандата или миссии. Во-вторых, если учреждения стремятся к осуществлению рекомендаций, изложенных в плане, они должны определить, насколько приоритетными должны быть эти рекомендации по отношению к другим обязанностям. Высока вероятность, что в результате будет сделано очень мало — по любой из этих причин.

Один из способов решения этой проблемы заключается в увязке рекомендаций с инструментами, имеющими законодательную основу — такими как официальные региональные или муниципальные планы землепользования или методы оценки экологического воздействия. По этой причине в описании, приведенном в разделе 3.5.3, особо отмечается то, каким образом рекомендации планов комплексного управления водными ресурсами водосбора, частного водосбора, притоков или экологических зон в провинции Онтарио включались в официальные планы, вторичные планы или процедуры оценки экологического воздействия.

В этой связи специалистам по планированию и управлению необходимо иметь представление о возможностях увязки рекомендаций планов комплексного управления водными ресурсами с региональными или местными официальными планами землепользования или с процедурами оценки экологического воздействия, если они имеют законодательную базу. Другой альтернативой является стремление к созданию законодательной базы для комплексного управления водными ресурсами, но на данный момент такие попытки являются исключением, а не правилом.

3.6.6 **Разработка институциональных механизмов**

После установления видения важно рассмотреть институциональные механизмы — формальные и неформальные сочетания ресурсов, правил, организационных структур и культур производства, механизмов и процессов, которые имеются для реализации комплексного управления водными ресурсами.

Опыт показывает, что правительства часто первыми вносят изменения в организационные структуры. Например, в 1970-х гг. были созданы министерства окружающей среды, а в 1990-х гг. — министерства устойчивого развития. Однако это может быть эффективным только тогда, когда определены пограничные или краевые задачи, как подчеркивается в разделе 3.2.6, и поэтому это редко является лучшей исходной точкой. Таким образом, при внедрении или изменении организационных механизмов для комплексного управления

водными ресурсами, как только видение было сформулировано, специалисты по планированию и управлению должны делать следующее:

- a) определить, какие меры могут быть предприняты для обеспечения достоверности или легитимности комплексного управления водными ресурсами. Обычно это делается при наличии некоторой комбинации законодательной базы, приверженности к административной политике и постоянной финансовой поддержки;
- b) решить, какие функции управления должны быть интегрированы. С учетом характеристик их полезности некоторые функции, такие как водоснабжение, очистка сточных вод и размещение отходов, могут быть отнесены к частному сектору, в то время как другие, такие как пойменное управление или защита болот, должны быть отнесены к государственному сектору, исходя из характеристик их общественной собственности;
- c) определить соответствующие организационные структуры, руководствуясь принципом, что структуры должны следовать за функциями, а не руководить ими. Среда структур существует начиная с одной большой централизованной и многоцелевой организации до множества небольших децентрализованных организаций с одной или ограниченным числом функций. Каждая организация имеет свои сильные и слабые стороны, и все они сталкиваются с пограничными или краевыми проблемами;
- d) поскольку структуры никогда не будут идеально согласовываться с функциями, далее необходимо рассмотреть, какое сочетание процессов (например, участие общественности и оценка воздействия) и механизмов (таких как межведомственные целевые группы или комитеты) будет наиболее эффективным для обеспечения координации, сотрудничества и согласованности среди различных учреждений или групп. Было сделано следующее наблюдение (Grindle and Hilderbrand, 1995):

Создателям потенциала необходимо разрабатывать механизмы активного взаимодействия и координации. Могут быть созданы формальные средства связи и координации, например комитеты высокого уровня и технические комитеты по координации, связывающие советы директоров или консультантов, совместные совещания и семинары, а также перемещение служебных помещений или улучшение технологий с тем, чтобы коммуникация стала физически легче. Для дополнения и поддержки этих взаимодействий на официальном уровне могут поощряться неофициальные деловые контакты.

Значение таких инициатив подчеркивается вновь и вновь:

Мероприятия, которые позволяют специалистам работать вместе друг с другом на равных, имеют все большее значение. Такие мероприятия включают сетевые и двусторонние партнерства, а также семинары, совещания и платформы для кооперации, которые облегчают взаимный обмен знаниями (Franks, 1999);

- e) самым важным, возможно, является то, что специалисты по управлению и планированию должны создавать организационную культуру и настраивать сотрудников на укрепление сотрудничества, а не на конкуренцию. По мнению Гриндла и Хилдербранда (Grindle and Hilderbrand, 1995), «без исключения все организации, которые правильно действовали, смогли привить своим сотрудникам чувство долга и приверженность целям организации» и «одним из наиболее важных наборов результатов является очевидность связи организационной эффективности с сильными сторонами и направленностью ее организационной культуры». Такая благоприятная культура может создаваться и подпитываться за счет обучающих и образовательных программ, ориентированных на сущность и необходимость совместных процессов и разрешение конфликтов.

Вышеупомянутые подходы вместе обеспечивают рамочную основу для оказания помощи специалистам по планированию и управлению в качестве альтернативных решений, рассматриваемых в отношении надлежащих институциональных механизмов для поддержки комплексного управления водными ресурсами.

3.6.7 Мониторинг и оценка

Как отмечалось в разделе 3.5.2, важно представлять ожидаемое будущее, к которому следует стремиться, а затем использовать комплексное управление водными ресурсами в качестве средства для его достижения. Не менее важно включить положение о мониторинге и оценке с тем, чтобы продвижение в сторону ожидаемого будущего можно было отследить и, при необходимости, скорректировать.

Для обеспечения нацеленности на результат нужно контролировать результативность: были ли достигнуты цели? Кроме того, внимание должно быть уделено эффективности (были ли цели достигнуты наиболее экономически эффективным способом?) и справедливости (честно ли распределяются выгоды и издержки?). Еще одним аспектом, который заслуживает внимания, является прозрачность и подотчетность: можно ли увидеть, как принимаются решения и выделяются ресурсы?

Сравнение описанных выше подходов, ориентированных на конечный результат и на процесс его получения, обеспечивает систематическую основу для оценки прогресса или его отсутствия, связанных с ролью комплексного управления водными ресурсами в содействии достижению видения. Без систематического мониторинга и последующей оценки возможность приобретения поучительного опыта снижается, как и возможность вносить коррективы в свете новой информации, знаний и опыта.

3.7 ПРЕДОСТЕРЕЖЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

3.7.1 Когда применять комплексное управление водными ресурсами

Слишком часто считается, что комплексное управление водными ресурсами — это хорошо или желательно. Однако, поскольку интеграция не происходит без затрат, при принятии решения, является ли целесообразным комплексное управление водными ресурсами, следует быть очень аккуратным. Трудозатраты персонала и другие ресурсы, необходимые для выполнения интеграции, становятся недоступными для других потребностей или задач. Часто забывают о необходимости установить, что серьезная нехватка ресурсов и/или проблемы ухудшения состояния окружающей среды являются результатом взаимодействия многих взаимосвязанных причинных факторов, решение которых требует комплексного подхода. И наоборот, многие случаи характеризуются относительно простыми проблемами, которые можно эффективно решать силами одного учреждения или организации. В этом случае комплексное управление водными ресурсами вряд ли будет необходимо. Однако, если есть множественные причины или действия большого числа учреждений или участников могут осуществляться в противоположных направлениях или быть предназначенными дополнять друг друга, то комплексное управление водными ресурсами будет необходимо (Hooper and others, 1999).

3.7.2 Проблемы осуществления

После принятия решения о целесообразности использования комплексного управления водными ресурсами важно убедиться, что имеются производственные возможности для перехода от теории к практике. Как отмечено в разделе 3.5, многие проблемы могут возникнуть при стремлении к осуществлению комплексного управления водными ресурсами: слишком

широкое толкование приводит к трудностям в своевременном выполнении анализов и планов; недостаток видения того, что именно должно быть достигнуто за счет применения комплексного управления водными ресурсами; отсутствие признания необходимости коррекции элементов на пространственных изменениях масштаба; путаница в роли партнеров и участвующих сторон, отсутствие доверия или легитимности плана комплексного управления водными ресурсами; неадекватные институциональные механизмы и низкий уровень мониторинга и оценки. Любая из этих проблем или их сочетание может помешать комплексному управлению водными ресурсами. Большинство из этих аспектов не являются присущими только для рассматриваемого подхода, они являются общими проблемами планирования и управления. Тем не менее, если эти проблемы не замечаются и не решаются, они, скорее всего, приведут к потере эффективности комплексного управления водными ресурсами и тем самым к его дискредитации.

Ссылки и дополнительная литература

- Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), 2007: Четвертый доклад об оценке — Изменение климата, 2007. Женева.
- Burton, J.R., 1986: The Total Catchment Management concept and its application in New South Wales. Proceedings of the Hydrology and Water Resources Symposium, 1986. Brisbane, Queensland, Griffith University.
- Department of Water Affairs and Forestry, 1997: White Paper on a National Water Policy. Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria.
- Department of Water Affairs and Forestry, and Water Research Commission, 1996: The Philosophy and Practice of Integrated Catchment Management: Implications for Water Resource Management in South Africa. Discussion Document, WRC Report No. TT 81/96, Pretoria, Water Research Commission.
- Görgens, A., G. Pegram, M. Uys, A. Grobick, L. Loots, A. Tanner and R. Bengu, 1998: Guidelines for Catchment Management to Achieve Integrated Water Resource Management in South Africa. WRC Report No. KV 108/98, Pretoria, Water Research Commission.
- Gray, B., 1989: *Collaborating: Finding Common Ground for Multiparty Problems*. San Francisco, Jossey-Bass. Abstract: <http://www.colorado.edu/conflict/peace/example/gray7278.html>.
- Grindle, M.S. and M.E. Hilderbrand, 1995: Building sustainable capacity in the public sector: what can be done? *Public Administration and Development*, 15:441–463. Abstract: [at http://www.grc-exchange.org/info_data/record.cfm?ld=35](http://www.grc-exchange.org/info_data/record.cfm?ld=35).
- Gunton, T.I. and J.C. Day, 2003: The theory and practice of collaborative planning in resource and environmental management. *Environments*, 31(2): 5–19. Abstract: http://goliath.ecnext.com/coms2/summary_0199-1243923_ITM&referid=2090.
- Himmelman, A.T., 1996: On the theory and practice of transformational collaboration: from social service to social justice. In:

- Creating Collaborative Advantage* (E. Huxham, ed.). Thousand Oaks, California, SAGE Publications.
- Hooper, B.P., G.T. McDonald and B. Mitchell, 1999: Facilitating integrated resource and environmental management: Australian and Canadian perspectives. *Journal of Environmental Planning and Management*, 42:747–766.
- Inter-American Development Bank, 1998: *Strategy for Integrated Water Resources Management*, Publication No. ENV-125. Washington, DC, Inter-American Development Bank.
- International Conference on Water and the Environment, 1992: International Conference on Water and the Environment: Development Issues for the 21st Century, Keynote Papers. Geneva, ICWE Secretariat, World Meteorological Organization.
- International Union for Conservation of Nature/United Nations Environment Programme/World Wildlife Fund, 1991: *Caring for the Earth: a Strategy for Sustainable Living*. Gland.
- Jenkins, H.A., 1976: *A Valley Renewed: The History of the Muskingum Watershed Conservancy District*. Kent, Ohio, Kent State University Press.
- Lazarus, P. 1997: Towards a Regulatory Framework for the Management of Groundwater in South Africa. WRC Report No. 789/1/98. DWAF Report Geo 2.2(389). Pretoria, Water Research Commission and Department of Water Affairs and Forestry.
- MacKenzie, S.H., 1996: *Integrated Resource Planning and Management: The Ecosystem Approach in the Great Lakes Basin*. Washington, DC, Island Press.
- Memon, P.A., 2000: Freshwater management policies in New Zealand. In: *Environmental Planning and Management in New Zealand*, (P.A. Memon and H. Perkins, eds). North Palmerston, New Zealand, Dunmore Press. Abstract at: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract.14322/ABSTRACT>.
- Mitchell, B. and D. Shrubsole, 1992: *Ontario Conservation Authorities: Myth and Reality*, Department of Geography Publication Series No. 35. Waterloo, Ontario, University of Waterloo.
- Mitchell, B. (ed.), 1990: *Integrated Water Management: International Experiences and Perspectives*. London, Belhaven Press.
- Organisation for Economic Cooperation and Development, 1989: *Water Resource Management: Integrated Policies*. Paris, Organisation for Economic Cooperation and Development.
- Richardson, A.H., 1974: *Conservation by the People: The History of the Conservation Movement in Ontario to 1970*. Toronto, University of Toronto Press.
- Tortajada, C., 2003: Workshop on Integrated Water Resources Management for South and South-East Asia, Bangkok, Thailand, 2–4 December 2002. *Water International*, 28(1)130–131.
- United Nations, 1977: Report of the United Nations Water Conference, Mar del Plata, 14–25 March 1977, E/CONF.70/29. New York, United Nations.
- , 1992: Report of the United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, 3–14 June 1992. United Nations publication E.93.I.8, Three Volumes. New York, United Nations.
- , 1997: *Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World*. New York, United Nations.
- Van Zyl, F., 1999: Above all else what do we have to do make a sustainable impact on diffuse source pollution? Proceedings of the International Conference on Diffuse Pollution. C. Barber, B. Humphries and J. Dixon (eds). Wembley, Western Australia, CSIRO Land and Water.
- World Summit on Sustainable Development, 2002: Plan of Implementation, at http://www.johannesburgsummit.org/html/documents/summit_docs/2309_planfinal.html.
- Young, G.J., J.C.I. Dooge and J.C. Rodda, 1994: *Global Water Resource Issues*. Cambridge, Cambridge University Press.

ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ ВОДНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ

4.1 ОЦЕНКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОЕКТЫ [ГОМС А00]

4.1.1 Необходимость оценки водных ресурсов

Под оценкой водных ресурсов понимается определение источников, области распространения, определяющих факторов, а также качества водных ресурсов, что является основой для определения возможностей их использования и регулирования (UNESCO/WMO, 1997). Оценка водных ресурсов крайне важна для устойчивого и рационального использования мировых водных запасов. Некоторые причины, подтверждающие вышесказанное, перечислены ниже (WMO/UNESCO, 1991):

- a) с ростом населения увеличиваются потребности в воде для питьевых целей, производства продовольствия, гигиены и других основных социальных и экономических нужд. Однако мировые водные ресурсы ограничены. В некоторых регионах мира потребности в водных ресурсах уже достигли своего предела, а во многих других — будут достигнуты в течение двух ближайших десятилетий. Сохранение этой тенденции приведет к тому, что к началу следующего века мировые водные ресурсы будут полностью использованы;
- b) антропогенная деятельность становится все более интенсивной и разнообразной и оказывает все большее и четко выраженное влияние на природные ресурсы, истощая их и загрязняя. Это, в первую очередь, относится к водным объектам многоцелевого назначения, качество воды которых может быть значительно снижено за счет физических воздействий и сброса в них широкого спектра загрязняющих веществ: химикатов, радиоактивных веществ, микроорганизмов и наносов;
- c) стихийные бедствия, связанные с водой, такие как наводнения, засухи и тропические циклоны, являются причиной неизмеримых потерь человеческих жизней и материальных ценностей на протяжении всего хода истории. Вырубка лесов и урбанизация значительно увеличивают опасность катастрофических наводнений, их масштабы и повторяемость;
- d) растет осознание того, что климат на планете не является постоянным и в действительности может изменяться под влиянием антропогенной деятельности. Несмотря на то, что существует широкоизвестное представление о том, что повышение средней температуры воздуха у поверхности Земли

из-за парниковых газов вызывает глобальное потепление, большее внимание должно быть уделено изучению влияния климата на распределение осадков, стока и подземных вод, которое, вероятно, будет значительным. Нет оснований полагать, что эти гидрологические характеристики останутся неизменными.

Эффективное управление водным хозяйством может осуществляться посредством взвешенного принятия решений, основанного на надежных данных наблюдений и информации о состоянии и динамике изменения водных ресурсов, включая количественные и качественные показатели и статистические данные о таких явлениях как наводнения, а также данных об использовании воды для различных хозяйственных целей.

Оценка водных ресурсов, в общем, является необходимым условием для освоения и эксплуатации водных ресурсов. Этот факт был признан Конференцией ООН по водным ресурсам, состоявшейся в Мар-дель-Плате в 1977 г., и отражен в резолюции 1 и рекомендации А принятого в Мар-дель-Плате Плана действий. На Конференции была подчеркнута необходимость более глубокого изучения количественных и качественных характеристик поверхностных и подземных водных ресурсов, а также их всестороннего мониторинга в целях управления этими ресурсами. После этого на Международной конференции по водным ресурсам и окружающей среде, состоявшейся в Дублине 26–31 января 1992 г., был предложен ряд рекомендаций, направленных на поддержку оценки водных ресурсов на национальном уровне (United Nations, 1992).

4.1.2 Компоненты программы по оценке водных ресурсов

Для того чтобы обеспечить предварительную оценку имеющихся водных ресурсов, на основе которой разрабатываются национальные или региональные долгосрочные планы управления ими, основополагающая программа по оценке водных ресурсов предусматривает сбор и обработку существующих гидрологических и гидрогеологических данных, а также дополнительных данных, необходимых для пространственной интерполяции.

Такие долгосрочные планы должны базироваться на учете ключевых современных и будущих потребностей в водных ресурсах. Компоненты программы по оценке водных ресурсов показаны на рисунке П.4.1 и

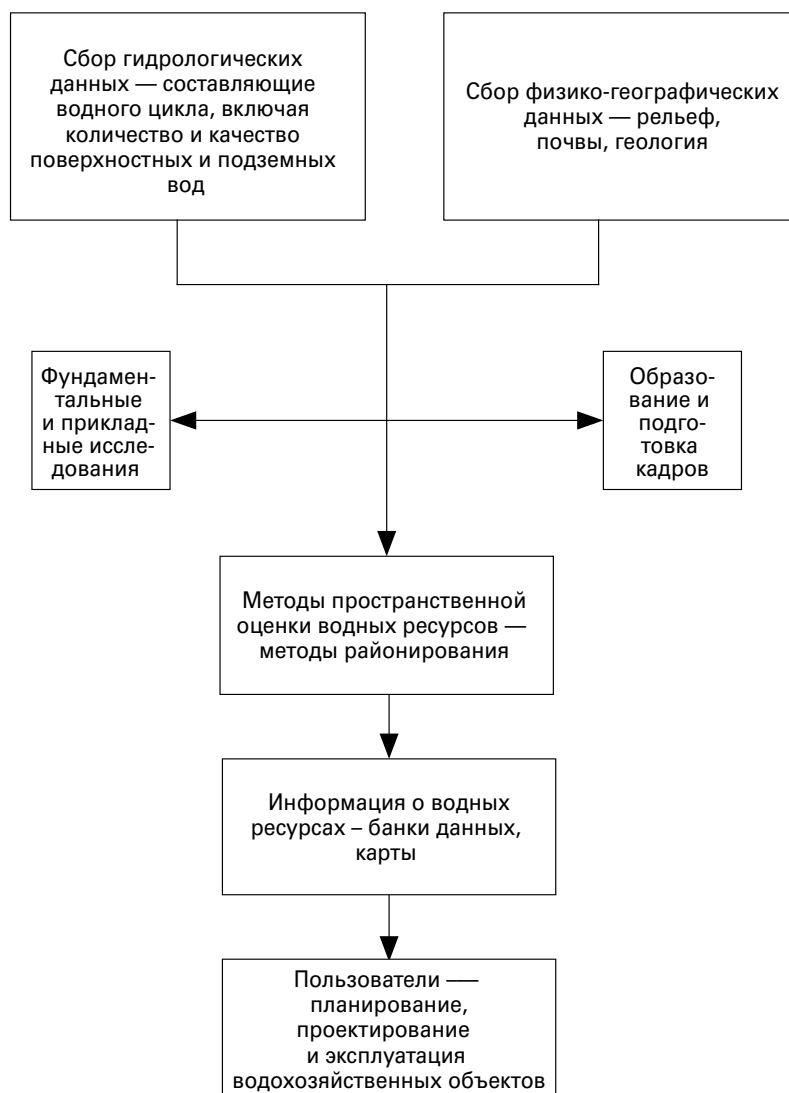


Рисунок II.4.1. Компоненты базовой программы по оценке водных ресурсов

включают, главным образом, следующие позиции (UNESCO/WMO, 1997):

- сбор гидрологических данных: сбор исторических данных о компонентах водного цикла в пунктах, распределенных по территории, для которой выполняется оценка водных ресурсов;
- сбор физико-географических данных: получение данных о естественных характеристиках подстилающей поверхности, которые определяют пространственные и временные изменения компонентов водного цикла, таких как рельеф, почвы, геологическое строение, землепользование и растительный покров;
- методы, используемые для пространственной оценки водных ресурсов: методы преобразования исходных данных в обобщенную информацию и увязка гидрологических данных с физико-

географическими с целью получения информации о характеристиках водных ресурсов в любой точке территории, для которой производится оценка.

Базовая программа по оценке водных ресурсов отвечает своей задаче, если вышеуказанные три компонента программы имеются в наличии и если, увязанные между собой, они достаточно надежны для того, чтобы обеспечить информацией о водных ресурсах, необходимой для целей планирования в любой точке территории, для которой выполняется оценка. Нужна определенность в отношении требований каждой отдельной страны к типу информации, требуемой для планирования; способа, которым эта информация получена и передана пользователям, а также последствий, которые возникнут в случае отсутствия такой информации или ее низкой точности при принятии решений на стадии планирования.

Все работы, связанные с составлением базовой программы по оценке водных ресурсов, требуют наличия квалифицированного персонала, применения эффективного оборудования и методов для полевых изысканий, проектирования и эксплуатации сети, а также разработки надежных методов пространственной интерполяции. Для этих целей, в свою очередь, может потребоваться обучение соответствующего персонала, а также применение фундаментальных и прикладных исследований для разработки необходимых методических подходов. Анализ этих видов деятельности может дать представление об их соответствии целям базовой оценки водных ресурсов или, в случае их несоответствия, указать на дополнительные меры, которые должны быть предприняты для обеспечения необходимой базы для дальнейшей разработки соответствующей программы по оценке водных ресурсов.

4.1.3 Анализ деятельности по оценке водных ресурсов

За оценку водных ресурсов отвечает каждая отдельная страна, и любое определение состояния осуществления такой оценки в соответствующей стране является также ответственностью данной страны. Публикация *WMO/UNESCO Water Resources Assessment: Handbook for Review of National Capabilities* (Оценка водных ресурсов — Справочник по обзору национальных возможностей) (UNESCO/WMO, 1997) была подготовлена с целью повышения возможностей стран оценивать свои достижения в области выполнения оценки водных ресурсов и обеспечивать основу для определения своих потребностей и действий, необходимых для удовлетворения минимальных требований. Методология, предлагаемая в Справочнике, охватывает весь спектр вопросов и действий, включаемых в базовую программу по оценке водных ресурсов. Существующий уровень оценки водных ресурсов соответствует минимальным принятым требованиям в отношении оборудования, квалификации персонала, образования, уровня подготовки и научных исследований. Он включает детальный обязательный набор сведений по каждому компоненту (см. рисунок II.4.1) и предложения по оценке каждого вида деятельности в большинстве случаев в количественных показателях.

Результаты такой оценки будут различны для каждой страны в зависимости от показателей соответствующей базовой программы по оценке водных ресурсов и особенностей страны и ее потребностей. Тем не менее, всегда будет иметь место минимальный набор сведений, которые встречаются практически в каждом случае. Этот набор включает:

- a) анализ существующих ведомственных структур для выполнения базовой программы по оценке

водных ресурсов, их преимуществ, недостатков и связанных с ними ограничений;

- b) сравнительная оценка наблюдательных сетей и определение тех элементов сети, которые требуют улучшения в отношении плотности станций, оборудования, наблюдателей и руководящего персонала, а также других факторов;
- c) обзор имеющихся исследований и программ по сбору и обработке физико-географических данных, необходимых для базовой оценки водных ресурсов;
- d) оценка применимости различных методов для расширения зоны действия базовой программы по оценке водных ресурсов, соответствующих данных, а также способов передачи информации;
- e) анализ потребностей в гидрологической информации для долгосрочного планирования, получения и передачи этой информации пользователям, а также результатов использования этой информации в процессе планирования, который определяет соответствие и несоответствие предъявляемым требованиям базовой программы по оценке водных ресурсов;
- f) оценка состава персонала и квалификационных показателей, требующихся для составления базовой программы по оценке водных ресурсов, и оценка существующих программ обучения и подготовки кадров относительно текущих и предстоящих требований;
- g) обзор фундаментальных и прикладных научных исследований в стране (и регионе), анализ их соответствия (или несоответствия) задачам оценки водных ресурсов применительно к текущим и будущим потребностям, включая потребности в региональной и международной научно-технической кооперации;
- h) выявление основных причин неувязок в программе в отношении институциональной структуры, финансовых ресурсов, оборудования, методов и т. д.;
- i) рекомендации по устранению любых недостатков базовой программы по оценке водных ресурсов путем национального или регионального сотрудничества и/или использования международной помощи.

4.1.4 Водохозяйственные проекты

Вода необходима во всех сферах жизни. Основная цель управления водными ресурсами заключается в том, чтобы обеспечить население достаточным количеством воды хорошего качества для различных социально-экономических нужд, сохраняя при этом гидрологические и биохимические функции экосистемы. В настоящее время растет осознание того, что развитие общества, как и освоение водных ресурсов, должно быть устойчивым. Имеется в виду, что природные

ресурсы мира должны использоваться в разумных пределах и охраняться с целью удовлетворения потребностей настоящего и будущих поколений.

В данной главе представлены рекомендации по применению методов гидрологического анализа, описанных в главах 5, 6 и 7 при проектировании и эксплуатации водохозяйственных объектов в вышеописанных целях. Кроме гидрологического анализа, описанного в данной главе, необходимо также проводить ряд социальных, экономических и экологических исследований; однако они не рассматриваются в настоящем Руководстве.

4.1.5 Цели водохозяйственного проекта

Как уже было отмечено в главе 3, комплексный подход к водохозяйственному планированию и управлению в пределах речного бассейна подходит и для управления межотраслевой деятельностью. Целостное управление запасами пресной воды как ограниченным и уязвимым ресурсом и интеграция водохозяйственных отраслевых проектов и программ в рамки социально-экономической политики на национальном уровне имеют первостепенное значение. Справедливое и ответственное использование водных ресурсов занимает центральное место в достижении целей в области развития, сформулированных в Декларации тысячелетия ООН, и борьбе с нищетой.

Природный водный цикл имеет комплексный характер в пространственном и временном отношении, однако удовлетворение человеческих нужд требует постоянного водоснабжения. Для этого необходима реализация стратегий освоения и управления водными ресурсами, которые обычно предусматривают инженерные работы. Интенсивная эксплуатация водных систем вследствие роста численности населения и экономического развития ведет к тому, что инженерный анализ, необходимый для проектов освоения водных ресурсов, должен стать более объективным и обоснованным в научном плане, чем прежде.

Водохозяйственные проекты обычно направлены на решение одной или нескольких из следующих задач:

- a) коммунальное водоснабжение;
- b) орошение;
- c) промышленное водоснабжение;
- d) рациональное использование подземных вод;
- e) производство электроэнергии;
- f) регулирование паводков;
- g) судоходство;
- h) рекреационное, эстетическое и традиционное использование вод;
- i) регулирование засоления и заиления;
- j) уменьшение загрязнения вод;

- k) охрана рыб и дикой природы;
- l) другие экологические задачи.

4.1.6 Многоцелевые проекты

С ростом уровня освоения и использования водных ресурсов во всем мире, становится все более важным планировать проекты, которые могут удовлетворять одновременно несколько целей. Например, проектируемое водохранилище может одновременно обеспечивать как водоснабжение, так и регулирование паводков ниже по течению реки. Гидрологические данные, необходимые для разработки многоцелевого проекта, представляют собой совокупность данных, необходимых для реализации каждой отдельной цели. Методы анализа, хоть и подобны тем, которые применяются при разработке одноцелевых проектов, являются более сложными. Для разработки оптимального варианта проекта необходимо рассмотреть различные комбинации размеров сооружаемых объектов и режимов их эксплуатации.

Основное противоречие при управлении водными ресурсами возникает в рамках разработки многоцелевых проектов. Проблема проектирования и эксплуатации многоцелевых систем рассматривается в разделе 4.2.

4.1.7 Проектный цикл

Проектный цикл показан на рисунке II.4.2. Цикл начинается с процесса идентификации, в ходе которого следует ответить на следующие вопросы:

- a) осуществим ли проект технически?
- b) превышает ли прибыль затраты?
- c) кому это выгодно?
- d) существуют ли лучшие альтернативы?
- e) допустимы ли социальные и экологические затраты?

Подготовка проекта требует четкого определения целей и задач проекта. Как только они будут сформулированы, появляется возможность определить актуальные проблемы и возможные решения. Кроме того, необходимо проанализировать соответствующие данные и информацию.

4.1.8 Предварительные исследования в целях водохозяйственного проектирования

Прежде чем тратить время и значительные средства на разработку водохозяйственного проекта, необходимо провести предварительное исследование выполнимости, целесообразности, масштабности проекта и его возможного влияния на те гидрологические факторы, которые воздействуют на окружающую среду и эффективность других проектов. Хотя это исследование

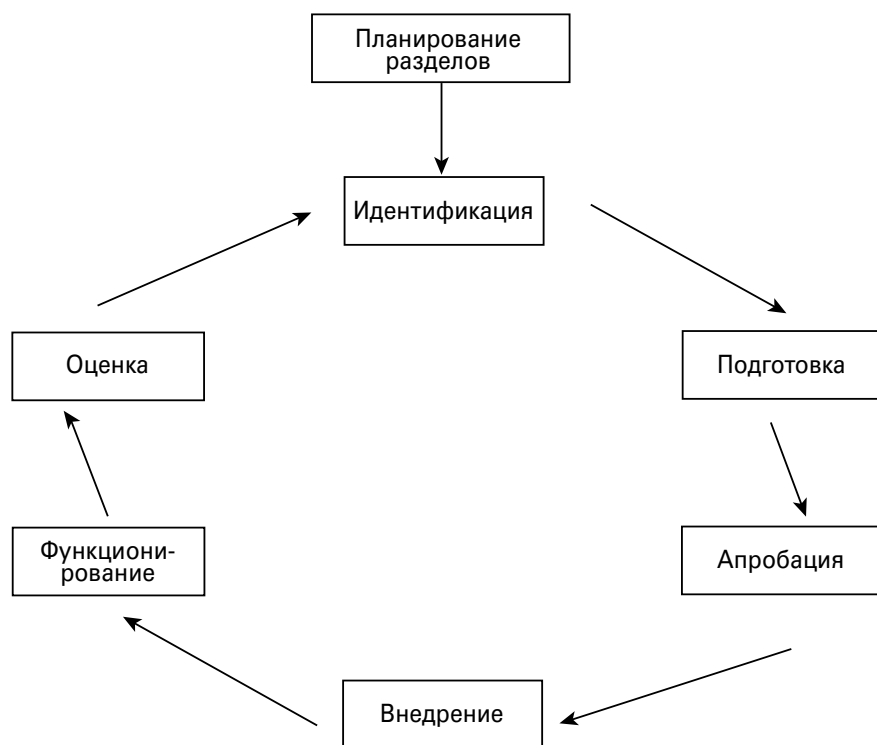


Рисунок II.4.2. Проектный цикл

приходится проводить на любых доступных материалах, например: на отрывочных гидрологических данных, старых картах и отчетах, — оно должно осуществляться с большой тщательностью, т. к. это именно та стадия, на которой часто принимаются принципиальные проектные решения, а также могут выявиться важные аспекты и последствия осуществления проекта.

В том случае, когда предварительные исследования указывают на то, что проект потенциально выгоден, можно переходить к более детальным исследованиям.

Виды гидрологических данных, необходимых для водохозяйственной деятельности, приводятся в представленной ниже таблице II.4.1.

Таблица II.4.1. Данные, необходимые для водохозяйственной деятельности

Назначение	Сфера применения	Рассматриваемый элемент	Требуемые данные
Рекогносцировка		Гидрология	Русловая сеть Водосборы Родники Особенности рек с постоянным, прерывистым и временным стоком
		Физическая география	Геология Топография и морфология Почвенный покров и типы почв Урбанизация
		Метеорология	10, 11 Распределение температур Распределение ветра Распределение снежного покрова
		Речной сток	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 — по отдельным створам
		Паводки	4, 5, 6
		Грунтовые воды	12, 13

(продолж.)

Таблица II.4.1. (продолж.)

Назначение	Сфера применения	Рассматриваемый элемент	Требуемые данные
Регулирование паводкового стока	Сооружения	Уровень воды	Зависимость глубина воды — расход воды для важных створов Гидравлично-топографические связи для поймы 4, 5, 6, 8 Площадь затопления поймы
		Осадки	Статистические данные интенсивных осадков на всей рассматриваемой территории Совместные данные о паводках и вызвавших их осадках
	Предупреждения о паводках	Прогноз	Время прохождения паводка Время запаздывания стока относительно осадков Последовательность прохождения паводка на различных протоках
		Предсказание	Временные ряды паводков Временные ряды ливневых осадков
	Зоны влияния паводков и страховка	Степень влияния паводка	Площадь, продолжительность, частота паводков Размыв и отложение наносов в период паводков
Орошение	Потребности водопользователей	Осадки	10
		Суммарное испарение	11 Транспирация
		Влажность почвы	Тип почвы Уровень грунтовых вод
	Водоснабжение	Речной сток	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9
		Грунтовые воды	12,13
		Водохранилище	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11
Использование грунтовых вод, включая пополнение	Водоносные слои	Грунтовые воды	12,13
	Водохранилища и пруды	Речной сток	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11
	Береговая фильтрация	Речной сток	3, 4, 6, 7, 8, 9
	Колодцы	Речной сток	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11
Производство электроэнергии	Высоконапорные плотины	Речной сток	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11
	Низконапорные плотины	Речной сток	2, 3, 4, 6, 7, 8 Зависимость глубина — расход в нижнем створе
Судоходство	Каналы	Глубина воды	Зависимость глубина — расход для важных створов 2, 3, 7, 8
		Паводковый сток	4, 6 Скорости течения при высоких уровнях воды Время добегания паводочной волны на различных участках потока Время запаздывания между выпадением осадков и подъемом уровня воды Распределение снеготаяния

(продолж.)

Таблица II.4.1. (продолж.)

Назначение	Сфера применения	Рассматриваемый элемент	Требуемые данные
Городское водоснабжение	Реки	Речной сток и весеннее половодье	1, 2, 3, 4, 7, 9
	Водоохранилища	Речной сток Грунтовые воды	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11 12,13
Промышленное использование	Реки	Речной сток	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9
	Водоохранилища	Речной сток	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11
	Водоносные слои	Грунтовые воды	12,13
Рекреационное, эстетическое и традиционное использование водных объектов	Озера и водоохранилища	Геоморфология	Связь уровень-объем Особенности береговой линии Волнение 9
		Климат	7, 10, 11 Распределение температуры воздуха Распределение ветра
	Реки	Речной сток Геоморфология Речной сток	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 Геометрия русла Связь глубина-расход-скорость течения Почва и растительный покров береговых участков 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 Колебания попусков воды из водоохранилища
Регулирование солености и содержания наносов	Разбавление	Речной сток	2, 3, 4, 6, 7, 8, 9
	Очистка	Паводки	4, 6, 8, 9
		Водоохранилища	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11
Снижение загрязнения	Разбавление	Речной сток	1, 2, 3, 4, 7, 8, 9
	Очистка	Паводки	4, 6, 9
		Водоохранилища	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11
Охрана флоры и фауны	Реки	Речной сток	2, 3, 4, 6, 7, 8, 9
		Озера и водоохранилища	Распределение колебаний уровня воды 9
		Сооружения	Изменения глубины, скорости течения, температуры воды, количества наносов и характеристик береговых формаций в верхнем и нижнем бьефах под влиянием сооружений

Примечание. Цифры соответствуют общим гидрологическим данным, перечисленным ниже.

- 1 — ряды ежемесячных и годовых объемов стока
- 2 — ряды средних суточных расходов
- 3 — кривые обеспеченности низкого стока
- 4 — кривые обеспеченности максимальных расходов
- 5 — кривые обеспеченности объемов стока за паводок
- 6 — формы типовых гидрографов паводков
- 7 — сведения о ледяном покрове

- 8 — эрозия, транспорт и оседание наносов
- 9 — качество воды
- 10 — распределение осадков во времени и пространстве
- 11 — распределение испарения во времени и пространстве
- 12 — размер и характеристики водоносного слоя
- 13 — ряды уровней воды соответствующих водоносных слоев

Практика применения гидрологических методов в различных областях водохозяйственной деятельности рассматривается в следующих разделах данной главы: 4.2 — предоставляет информацию об оценке водоотдачи и регулировании емкости водохранилища; 4.3 — посвящен регулированию паводков; 4.4 — орошению и осушению; 4.5 — гидроэнергетическим и другим энергетическим объектам; 4.6 — судоходству и регулированию речного русла; 4.7 — управлению водными ресурсами на урбанизированных территориях; 4.8 — переносу наносов и морфологии речных русел; 4.9 и 4.10 — вопросам окружающей среды.

4.2 ОЦЕНКА ЕМКОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА И ЕГО ВОДООТДАЧИ [ГОМС К75]

4.2.1 Общие положения

В этом разделе рассматриваются достижимая водоотдача водохранилища и запасы воды, необходимые для поддержания определенной водоотдачи в отношении систем водных ресурсов. Упор делается на поверхностные воды, хотя во всех случаях необходимо помнить о гидрологических взаимосвязях между поверхностными и почвенно-грунтовыми водами, которые просто представляют собой различные формы одного и того же ресурса в гидрологическом цикле. Большинство принципов объясняется на примерах систем одной реки и одного водохранилища, хотя также рассматриваются и подходы к работе со сложными системами водных ресурсов, состоящими из нескольких водохранилищ в различных бассейнах.

Водоотдача системы водных ресурсов — это объем воды, который может быть извлечен с определенным расходом в течение определенного периода времени. Как правило, выражается в виде годового объема в млн м³ в год. Расход извлекаемой воды может варьироваться в течение года в зависимости от предполагаемого использования. Для бытовых, промышленных и горнодобывающих нужд вода требуется с относительно постоянным расходом в течение всего года, тогда как потребность в воде для орошения характеризуется значительной сезонностью. Природные водотоки, напротив, гораздо более изменчивы по водности. Реки обычно характеризуются сильной сезонностью естественного стока, которая усугубляется внутрисезонными колебаниями стока и изменчивостью общего объема годового стока.

Если расход отводимой воды принять постоянным, то самая высокая водоотдача незарегулированной реки равна наименьшему стоку в реке, как это показано на рисунке II.4.3. Путём регулирования стока в реке

с помощью плотин можно аккумулировать воду во время паводков, чтобы сбрасывать ее в период межени, как это показано пунктиром на диаграмме. Это увеличивает количество воды, которое можно извлекать постоянно, и, следовательно, водоотдачу. Чем больше водохранилище, тем больше водоотдача, которая может быть достигнута при ограниченных физических характеристиках системы. Большую годовую водоотдачу можно получить и там, где сезонные требования хорошо коррелируют с характеристиками стока. Для удобства описания речь будет идти и далее о постоянном расходе отводимой воды, если только не указано иное.

В районах, где средний годовой сток или средний годовой расход сильно превышает потребности к воде, но где минимум стока может быть ниже требуемой нормы отведения, в центре внимания, как правило, оказывается определение емкости водохранилища, необходимого для поддержания заданной водоотдачи в период низкого стока. Так как сток меняется из года в год, периоды низкого стока (как и наводнения) не всегда бывают одинаковой интенсивности и продолжительности. Поэтому следует рассмотреть вопрос о том, будет ли экономически правильно проектировать водохранилище той емкости, которая позволит поддерживать его водоотдачу даже при самых суровых условиях низкого стока (засухе), или же экономически более верным является создание меньшего водохранилища, и, таким образом, придется согласиться с периодической нехваткой воды (относительно полной водоотдачи). Таким образом, задача состоит в том, чтобы взвесить ожидаемые выгоды и риски, а также связанные с ними затраты и стоимость водохранилища.

Там, где сток ограничен, или там, где водные ресурсы уже интенсивно используются, внимание больше смещается в сторону оптимального использования воды и водоотдачи, которой можно достигнуть с помощью различных емкостей, нежели в сторону

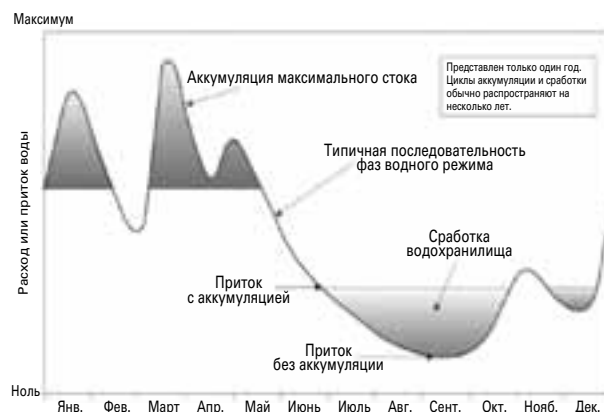


Рисунок II.4.3. Речной сток и его аккумуляция

определения емкости, необходимой для поддержания желаемой водоотдачи. В таких случаях оптимизация ресурсов добавляет еще одну сторону исходной проблеме противопоставления риска и оптимизации стоимости.

По причине высокой степени освоения водных ресурсов и их эксплуатации в большинстве районов мира оптимизация имеющихся ресурсов становится все более важной. Далее уделяется должное внимание аспектам оптимизации ресурсов.

4.2.2 **Понятие водоотдачи**

В этом разделе представлены основные параметры и ключевые понятия, связанные с определением водоотдачи, о которой говорится в этой главе.

4.2.2.1 **Временной ряд**

Временной ряд определяется как хронологическая последовательность данных, таких как сток, осадки и испарение в определенном месте. Ежемесячные данные чаще всего используются при определении водоотдачи больших систем водных ресурсов, однако могут быть выбраны данные, осредненные за более или менее короткие интервалы.

Как можно увидеть на рисунке II.4.3, временной ряд данных о стоке определяет водоотдачу реки. Если сток постоянен, например водоотдача равна среднему стоку, то он теоретически может быть отведен без регулирования. Чем больше изменчивость стока, тем выше необходимость регулирования посредством водохранилищ.

4.2.2.2 **Природные воздействия**

Потери стока рек вследствие, например, испарения и инфильтрации, являются частью гидрологического цикла и находят свое отражение в рядах наблюдений за стоком, которые используются для определения водоотдачи. Создание крупных водохранилищ в качестве средства регулирования стока изменяет природные условия равновесия, результатом чего, как правило, являются дополнительное испарение и инфильтрация.

4.2.2.2.1 **Испарение**

Слой воды, испаряющейся ежегодно с поверхности водохранилища, может изменяться от примерно 400 мм в условиях холодного влажного климата до более 2 500 мм в жарких засушливых регионах. Следовательно, испарение является важным фактором во многих проектах и заслуживает серьезного внимания.

Методы оценки испарения с водохранилищ по данным об испарении по испарителям и по метеорологическим данным описаны в разделе 4.2, том I, настоящего Руководства. В случае отсутствия данных об испарении по испарителям или соответствующих метеорологических данных в близлежащих от водохранилища пунктах для определения испарения с водохранилищ используются региональные расчетные значения этих характеристик.

При расчетах водного баланса важно учитывать фактическое испарение (см. раздел 4.2.3, том I), учитывая осадки на поверхность водохранилища. Так как периоды высокого и низкого стока обычно соответствуют влажным и сухим климатическим условиям, наиболее реалистичное представление фактических условий можно получить там, где временные ряды осадков или испарения и стока полностью синхронизированы. Если соответствующие данные по испарению не будут доступны, как это часто бывает на практике, могут быть использованы среднемесячные данные, по крайней мере, для отражения сезонных колебаний.

Испарение с поверхности водохранилищ представляет собой потерю не только потенциальной водоотдачи, но и потерю воды из системы ресурсов поверхностных вод и, таким образом, фактическую потерю ресурсов. Особое внимание должно уделяться минимизации испарения. По возможности, при выборе местоположения плотины при проектировании водохранилища следует ориентироваться на минимальное значение площади водной поверхности к единице объема воды. Были проведены обширные исследования в отношении снижения испарения с поверхности воды путем распространения на ней мономолекулярных пленок (см. раздел 4.4.1, том I). Однако основные проблемы, связанные с применением этих методов для больших водоемов, остаются пока нерешенными. Термическая стратификация водохранилищ и различие в температуре воды приточных и сбрасываемых вод могут оказывать значительное влияние на испарение с водохранилища. Это влияние почти невозможно определить теоретически и лучше всего оценивать его путём сравнения с существующими водохранилищами.

4.2.2.2.2 **Инфильтрация**

Потери воды из водохранилищ вследствие инфильтрации или просачивания в значительной степени зависят от местных гидрогеологических условий.

Плотины в основном располагаются на хорошем геологическом основании, где геологические образования под бассейном относительно непроницаемы. В таких условиях уровень грунтовых вод, залегающих в непосредственной близости от нового водохранилища,

в целом стабилизируется в новом состоянии равновесия спустя некоторое время после введения нового водохранилища в эксплуатацию с относительно небольшими и даже незначительными потерями за счет инфильтрации.

Там, где бассейн водохранилища целиком или частично подстилается проницаемыми слоями, такими как пески, доломиты и карстовые образования, потери могут быть значительными. Меры по контролю таких потерь могут быть технически сложными и дорогостоящими и могут сделать проект неосуществимым.

Оценить ожидаемые потери за счет инфильтрации и просачивания можно посредством геологических изысканий в бассейне водохранилища и в месте расположения плотины, а также путем сравнения с существующими водохранилищами в аналогичных условиях. В отличие от потерь, вызванных испарением, потери, вызванные инфильтрацией и просачиванием, не обязательно представляют собой фактические потери ресурсов, поскольку они могут пополнять подземные воды или сток реки ниже по течению от плотины.

4.2.2.2.3 **Отложение наносов**

Отложение наносов в водохранилищах со временем уменьшает его вместимость, а, следовательно, может повлиять на водоотдачу водохранилища в долгосрочной перспективе и осуществимость проекта.

По этой причине проект любого водохранилища должен учитывать ожидаемое количество наносов, которое отложится в течение экономического срока службы плотины, и предусматривать эквивалентный объем дополнительного свободного пространства в ложе будущего водохранилища или принимать в расчет уменьшение со временем ёмкости водохранилища, а значит и водоотдачи. Если водохранилище аккумулирует наносы, то река, вероятно, будет больше размывать свое русло ниже по течению, и это следует принять во внимание на ранних стадиях планирования.

Для того чтобы обеспечить соответствие расчетных значений отложений наносов фактическим, необходимо разработать программу батиметрических исследований. Это особенно актуально в регионах, где перенос наносов происходит эпизодически и связан с прогнозируемыми и экстремальными гидрологическими явлениями, например в полузасушливых и засушливых районах, а также там, где изменения условий землепользования привели к увеличению эрозии. Батиметрические исследования могут проводиться с использованием стандартных методов глубинного зондирования, либо с помощью соответствующего дистанционного зондирования. В зависимости от количества

наносов и распределения гранулометрического состава, а также характеристик реки и бассейна водохранилища, большая часть наносов может аккумулироваться на верхних участках водохранилища. По этой причине удаление наносов — сложный или дорогостоящий процесс. Однако можно спроектировать водосбросные сооружения, которые периодически могут использоваться для сброса части накопившихся наносов из водохранилища. Более подробная информация о наносах, характеристиках процесса их переноса и возможных мерах по очистке может быть получена в главе 5, том I, и в разделе 4.8, том II.

4.2.2.3 **Воздействие антропогенной деятельности**

Освоение водных ресурсов и некоторые виды землепользования на территории, лежащей выше по течению от проектируемого водохранилища, меняют естественные характеристики стока в месте расположения водохозяйственного объекта и могут оказывать значительное воздействие на водоотдачу водохранилища. Освоение водных ресурсов может включать в себя строительство регулирующих сооружений, водозаборов, водоотводящих конструкций, возврат вод и переброску стока из других водосборов. Наибольшее воздействие на водные ресурсы и наносы оказывают следующие виды хозяйственной деятельности: урбанизация, лесонасаждение, вырубка лесов, выращивание определенных сельскохозяйственных культур, например для производства риса и сахара, денудация земли и некоторые методы сбора дождевого стока. В последующих разделах данной главы рассматривается подобная деятельность и предоставляется информация, которая будет полезна при оценке возможных последствий влияния деятельности человека.

При определении водоотдачи системы водных ресурсов важно надлежащим образом учитывать антропогенные факторы. В частности, необходимо принимать во внимание любые тенденции и должным образом учитывать возможные будущие изменения.

4.2.2.4 **Данные наблюдений за стоком воды**

Ряды данных наблюдений за стоком или фактические данные о стоке относятся к полевым данным (см. главу 5, том I). Следовательно, такие ряды, по сути, отражают последствия влияния деятельности человека и, за исключением естественных или незатронутых водосборов, показывают некоторые изменения с течением времени. В целом ряды данных наблюдений требуют некоторой обработки для заполнения пропусков в данных (см. раздел 9.7.2, том I) и для оценки последствий освоения.

4.2.2.5 Временные ряды естественного стока

Временные ряды естественного стока отражают характеристики стока до воздействия на него человека. На совершенно неосвоенных водосборах наблюдаемый сток в полной мере отражает природные условия. Для водосбора, где освоение имеет место, реалистичные оценки того, каким был бы сток в естественных условиях, можно получить путем расчета воздействия различных влияющих факторов и путем корректировки временных рядов стока соответственно.

4.2.2.6 Искусственные временные ряды стока

Искусственные ряды — это ряды, которые формируются с помощью компьютерной модели. По отношению к стоку используют два вида искусственных рядов: детерминистические и стохастические ряды.

Детерминистические ряды в основном используются для пополнения и расширения недостаточных временных рядов стока. Это достигается за счет использования гидрологических моделей, как описано в главе 6.

Стохастический ряд — это тот, который случайно меняется во времени, возможно, с некой структурой зависимости, и может заменить ряд наблюдаемых данных при оценке будущих состояний (Box and Jenkins, 1970; Pegram and McKenzie, 1991; Hipel and others, 1977). Статистические свойства стохастически созданных рядов таковы, что, они, как считается, появляются из той же генеральной совокупности и генерируются на основе тех же природных процессов, которые характеризуют естественные временные ряды, лежащие в их основе. Стохастические последовательности данных, упомянутые в этой главе, в основном относятся к стоку и используются для исследования вероятностного поведения водоотдачи из водохранилищ. Однако те же принципы отбора и обработки данных могут применяться к временным рядам осадков и другим гидрологическим переменным, которые имеют большое значение для исследования водных систем.

4.2.2.7 Целевой попуск воды

Целевой попуск — это предполагаемый объем воды, который собираются получить из водохранилища или водной системы для обеспечения ее потребностей на определенный период, обычно выражается как годовая величина.

4.2.3 Оценка соотношения «ёмкость–водоотдача»

Многие компьютерные модели были разработаны для расчета отношений «ёмкость–водоотдача», и они

относительно легкодоступны. В этом разделе кратко описаны основные принципы, заложенные в основу этих моделей; более подробная информация приводится в разделах 4.2.4 и 4.2.5.

4.2.3.1 Численный метод

В своей основной форме оценка водоотдачи — это простое последовательное вычисление баланса между количеством воды, поступающей в водохранилище (сток, осадки), и сбрасываемой или потерянной водой из водохранилища (водозабор, испарение, утечка). Уравнение имеет следующий вид:

$$S_i = S_{i-1} + I_i + P_i - E_i - D_i - O_i = S_{i-1} + \Delta S_i, \quad (4.1)$$

где S_i отображает запасы воды в водохранилище в конце временного интервала i , S_{i-1} отображает запасы в начале временного интервала i , I_i является притоком в течение интервала i , P_i является осадками в течение интервала i , E_i является испарением в течение интервала i , D_i является попуском или отведением во время интервала i , O_i является сбросом во время интервала i и ΔS_i является изменением запасов воды в водохранилище в течение интервала i .

Там, где используется шаг по времени протяженностью в неделю или больше, средняя площадь поверхности водоема за интервал времени между t_{i-1} и t_i используется для расчета осадков и испарения.

Там, где водохранилище должно поддерживать определенный попуск, уравнение решается для различных предполагаемых максимальных емкостей (S) с целью найти итерационным способом объём, когда водохранилище почти истощается, или минимальный эксплуатационный объём. Там, где уже существуют плотины или запасы воды постоянны, расход сбрасываемой воды, который должен поддерживаться, можно определить введением в уравнение вместо объёма воды в водохранилище объёма попуска в качестве переменной. Последовательность значений ёмкости водохранилища, которая получается в результате решения уравнения, называется графиком изменения ёмкостей.

График, как правило, будет ограничен полным и минимальным эксплуатационным объемом водохранилища. В целом график для данной последовательности притока и нормы сброса будет функцией начальной ёмкости водохранилища и отличаться для разных начальных уровней. Однако, как только соответствующий полный или минимальный эксплуатационный объём будет достигнут, графики будут неразличимы для последовательности данных притока и нормы сброса.

Период максимальной сработки водохранилища, то есть от заполненного состояния до минимального эксплуатационного объема и восстановления снова до заполненного состояния, называют критическим периодом. Для достижения стабильности в анализе важно понимать, что критический период четко определяется с помощью графика изменения емкостей водохранилища.

Тем не менее, тщательный анализ графика в отношении возникновения периодов низкого потока остается очень важным. Потенциально более резкие периоды низкого стока по отношению к тем, что определяет критический период, могут наблюдаться в начале или в конце ряда значений притока, но только там, где первая или последняя часть таких периодов низкого потока может не входить в доступную длину ряда. Если есть такая вероятность, следует произвести приведение к норме сброса путём учёта фактического изменения запасов воды в водохранилище за период анализируемой последовательности данных.

В упрощенном случае, описанном выше, предполагалось, что водоотдача равна норме сброса. Можно, однако, поставить задачу отвести больше или меньше воды, нежели водоотдача водохранилища или системы водных ресурсов. Значимость целевого попуска по отношению к характеристикам водоотдачи водной системы более подробно описана в разделе 4.2.4.

4.2.3.2 Графический метод

Графический метод предлагает простую альтернативу для визуального представления результатов последовательного решения уравнения (4.1).

При известных притоке I и попуске D объем воды в водохранилище S за время t математически выражается уравнением:

$$S_t = S_0 + \int_0^t (I - D) d\tau = S_0 + \int_0^t I d\tau - \int_0^t D d\tau = S_0 + I_t^* - D_t^* \tag{4.2}$$

(Для удобства демонстрации влияние испарения и осадков исключено, и водозабор отображает весь отток воды. Потери будут там, где интегральная кривая оттока превышает интегральную кривую попуска, как это показано на рисунке II.4.4.).

Графики интегральных сумм I^* и D^* представляют собой соответственно интегральные кривые притока воды и оттока, а S_0 является начальным объемом воды в водохранилище. Пример использования такого метода представлен на рисунке II.4.4, согласно

которому полезный объем водохранилища S определен для постоянного попуска при условии, что водоснабжение будет бесперебойным в течение всего расчетного периода. Этот метод исходит из предположения полубесконечного (бездонного) водохранилища. Постоянный попуск соответствует постоянному наклону интегральной кривой D^* . Линия, параллельная D^* , проведена через каждый пик на интегральной кривой притока I^* . Необходимый запас воды S равен максимальному вертикальному расстоянию между любой точкой на кривой I^* и соответствующей ей точкой на любой из линий, параллельных D^* .

Графический метод широко использовался в прошлом. Однако возможности компьютеров резко возросли за эти годы, что облегчает решение уравнения (4.1). Кроме того, цифровое решение обеспечивает большую гибкость при анализе различных сценариев, поэтому графический метод в настоящее время используется редко, если вообще используется.

4.2.3.3 Влияние длины ряда наблюдений

Хотя четких нормативов для минимальной длины ряда нет, надежный анализ водоотдачи, как правило, возможен при периоде наблюдений в 10–20 раз больше критического периода. Там, где изменчивость стока мала и где присутствует необходимость в основном в сезонном регулировании (менее одного года), минимальная длина ряда от 10 до 20 лет является достаточной. Однако в полусухих и засушливых районах обычно требуется водохранилище на срок более года, так как часто наблюдаются критические периоды от 5 до 10 лет и дольше. В таких условиях лучше использовать длину ряда от 50 до 100 лет.

Даже там, где существуют достаточно длительные наблюдения за стоком, в будущем неизбежны более



Рисунок II.4.4. Метод массовой кривой для определения емкости водохранилища

серьезные наводнения и засухи. Кроме того, практически наверняка последовательности значений стока, наблюдаемые в прошлом, никогда не будут в точности повторяться в будущем. Однако очевидно, что чем дольше период наблюдений, на основе которого строится последовательность притока, тем более надежными будут оценки предполагаемой водоотдачи на выходе. Хотя исторические наблюдения являются единственной доступной фактической информацией, улучшенная оценка возможных экстремальных явлений может быть получена посредством стохастической генерации стока, как описано в разделе 4.2.2.6.

4.2.4 Классификация водоотдачи

Характеристики водоотдачи водных систем слишком сложны, чтобы их можно было описать одной формулой, такой как уравнение (4.1), и требуют более полного описания, нежели представленное выше.

Для систематизации водоотдачи водохранилища или системы водных ресурсов были разработаны следующие понятия: базовая водоотдача, гарантированная водоотдача, дополнительная водоотдача, негарантированная водоотдача и средняя водоотдача (Basson and others, 1988). Это облегчает графическое представление поведения водохранилища или системы водных ресурсов, как это показано в упрощенном виде на рисунке II.4.5. Значения для диаграммы получают из решения уравнения (4.1) для различных целевых попусков и регистрации соответствующих результатов.

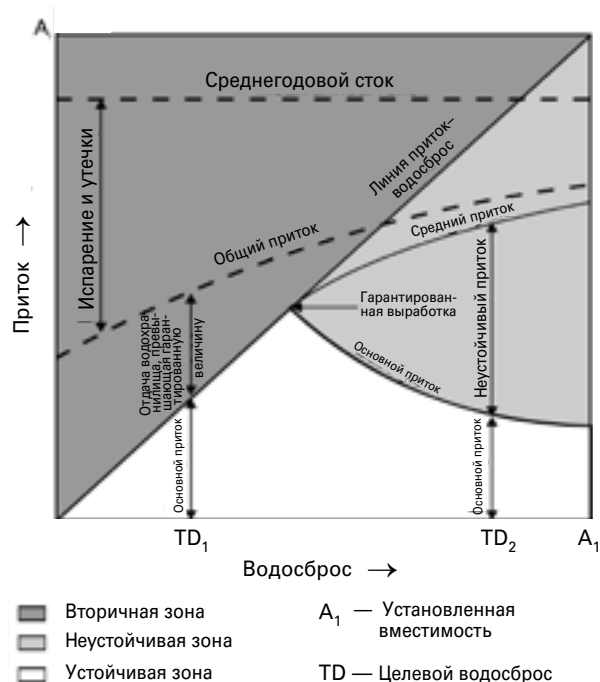


Рисунок II.4.5. Упрощенная диаграмма взаимосвязи сброски и уровней

Такие диаграммы улучшают дальнейшее понимание поведения системы при различных эксплуатационных условиях. Они особенно полезны там, где водные ресурсы интенсивно используются, где присутствует высокая изменчивость стока и где требуется определение водоотдачи и управление сложными системами водных ресурсов.

Базовая водоотдача — это минимальная водоотдача в течение определенного количества последовательных интервалов времени, которая может быть получена от речной системы или водохранилища при данной последовательности притока при условии обеспечения данного целевого попуска в соответствии с заданной схемой спроса на воду и заданным режимом эксплуатации. Базовая водоотдача возрастает с увеличением целевого попуска до тех пор, пока не будет достигнуто состояние, когда водохранилище не сможет непрерывно отдавать воду на уровне целевого попуска; в результате базовые водоотдачи станут меньше, чем целевой попуск.

Гарантированная водоотдача — это максимальная базовая водоотдача. Для анализа на основе исторических данных наблюдений за стоком вводится понятие исторической гарантированной водоотдачи, чтобы отличить её от гарантированных размеров водоотдачи, полученных с помощью вероятностных методов, как это описано в разделе 4.2.5. Историческая гарантированная водоотдача связана с конкретной ёмкостью водохранилища, может меняться в зависимости от длины временной последовательности данных о притоке. На самом деле она, вероятно, будет меньше для больших рядов притока, потому что повышается вероятность экстремально низких значений стока.

Водоотдачи, рассчитанные по методологиям, описанным в разделах 4.2.3.1 и 4.2.3.2, аналогичны историческим гарантированным объемам водоотдачи.

Дополнительная водоотдача — это водоотдача, которая может быть получена сверх целевого попуска. В соответствии с определением дополнительную водоотдачу получают из водохранилища только в то время, когда водохранилище заполнено до нормального подпорного уровня. По этой причине оценка дополнительной водоотдачи для различных максимальных норм отведения может предоставить ценные данные для определения потенциала дальнейшего освоения системы водных ресурсов. Дополнительную водоотдачу часто используют для генерации дополнительной гидроэнергии или для иного временного полезного водопотребления там, где есть соответствующие сооружения.

Негарантированная водоотдача — это средняя водоотдача, которая может быть получена от водоресурсной

системы сверх полезной водоотдачи, но без превышения целевого попуска. Это не непрерывная отдача, и потому на неё нельзя рассчитывать на постоянной основе.

Средняя водоотдача определяется как сумма величин базовой и негарантированной водоотдачи, усредненная за анализируемый период. Она определяет водоотдачу, которую можно, в среднем, получить от системы, однако часть которой не может непрерывно поддерживаться.

Полная водоотдача — это просто сумма величин базовой, дополнительной и негарантированной водоотдачи.

Дальнейшая интерпретация диаграммы связи нормы попуска и водоотдачи дана в работе Бассона (Basson and others, 1994).

4.2.5 Вероятностный метод

4.2.5.1 Зависимость ёмкость–сток

Проектирование и эксплуатация водохранилища является важным компонентом большинства проектов в области освоения водных ресурсов. Хотя проектная мощность хранилища будет зависеть от потребностей в воде, основным фактором, влияющим на это решение, будет доступный объем стока в реке на месте планируемого водохранилища. Однако его величина колеблется от года к году, и такая изменчивость должна быть принята во внимание.

Точная оценка емкости водохранилища имеет очень большое значение. Если емкость будет недостаточной, будущее водохранилище не будет служить обществу в полной мере, что может привести к непроизводительному расходованию скудных водных ресурсов. Вместе с тем преувеличенная оценка емкости может привести к тому, что водохранилище будет редко заполняться, несмотря на высокую стоимость строительства, таким образом проект окажется невыгодным. Следовательно, критерии для выбора емкости водохранилища должны включать в себя не только общий спрос на воду, но и то, с какой обеспеченностью он должен удовлетворяться. Например, обеспеченность гарантированной водоотдачи 75 % означает, что для целей орошения воды будет хватать, по крайней мере, в течение трех из каждых четырех лет. Стопроцентная обеспеченность гарантированной водоотдачи означает, что необходимое количество воды будет доступно каждый год — в 100 % случаев, но это может быть достигнуто, только если норма водоснабжения меньше, чем в случае 75 % обеспеченности водоотдачи. Это, в свою очередь, будет удовлетворять потребности в воде гораздо в меньшей степени.

В разных странах существуют различные критерии для планирования водохозяйственных проектов. Понятие процента обеспеченности с допущением определенной вероятности отказа часто применяется в развивающихся странах, поскольку они придают огромное значение экономической рентабельности проектов. С другой стороны, в развитых странах, например в Соединенных Штатах Америки, основным критерием является удовлетворение потребностей в воде для конкретной цели почти со 100 % вероятностью. Процент также варьируется в зависимости от назначения водохранилища. Как правило, он может быть установлен на уровне 75 % для орошения, 90 % для гидроэлектростанций и 100 % для коммунального водоснабжения.

Для определения стока заданной вероятности в заданном створе реки может быть использована следующая методика:

- а) годовая водоотдача брутто или естественный объем стока, также известный как незарегулированный или исторический сток. Она определяется как сток, который имел бы место в данном створе реки, если бы не было никаких заборов воды или перераспределения стока из-за пределов речной системы на верхних участках. В этом случае естественная инфильтрация и испарение не принимаются во внимание. Естественный сток может быть определен путем добавления к наблюдаемому притоку вод, забранных для орошения, бытового и промышленного применений как из поверхностных, так и из подземных источников, вод, удерживаемых в водохранилищах (как поверхностных, так и подземных) и потерь за счет испарения из водохранилищ, и вычитания возвратных вод от различных видов использования от поверхностных и подземных источников. Это представлено в следующем уравнении:

$$R_n = R_o + R_{ir} + R_d + R_{gw} - R_{ri} - R_{rd} - R_{rg} + S + E, \quad (4.3)$$

где R_n является естественным стоком, R_o — наблюдаемый приток, R_{ir} — водозабор на орошение, R_d — водозабор для бытовых, промышленных и других нужд, R_{gw} — отвод грунтовых вод, R_{ri} — возвратная вода с орошаемых площадей, R_{rd} — возвратная вода от бытовых, промышленных и других объектов, R_{rg} — приток подземных вод, S — увеличение объема воды в водохранилище и в бассейне, и E — это полное испарение с поверхности водохранилищ.

Если присутствует межбассейновый переход воды в бассейн реки или из него, ее количество будет соответственно вычтено от показателя R_n или прибавлено к нему;

- б) чтобы установить процент обеспеченности стока в данном створе реки, для которого имеется ряд

непрерывных наблюдений за естественным стоком в течение нескольких лет N , годовые значения естественного стока ранжируют в порядке убывания. Значению стока за каждый год присваивается порядковый номер сверху вниз и, если M — это порядковый номер года, обеспеченность стока для этого года (D) рассчитывается по следующей формуле: $100M/N$. Некоторые предпочитают этой формуле вариант $100M/(N+1)$;

- с) год, который будет представлять заданную обеспеченность стока, может быть установлен непосредственно, используя соотношение $M = DN/100$ или $D(N+1)/100$ и величину стока заданной обеспеченности, полученную с помощью ряда наблюдений за естественным стоком. В случаях, когда M не является целым числом, могут потребоваться небольшие интерполяции между значениями стока двух лет, между которыми находится M , с тем чтобы получить ближайший надежный сток, точно соответствующий заданной обеспеченности;
- д) такие же результаты будут получены при ранжировании рядов наблюдений за стоком по возрастанию, а не по убыванию.

Естественный сток, полученный из уравнения (4.3), может быть также использован для распределения стока между различными потенциальными пользователями, такими как прибрежные государства.

4.2.5.2 Риск отказа и надёжность водоснабжения

Существуют различные формулировки для определения отказа водоресурсной системы. В этой главе предпочтение отдаётся определению, в соответствии с которым под отказом системы понимается ее неспособность обеспечить базовую водоотдачу, связанную с определенным целевым попуском. Риск отказа водоресурсной системы определяется как вероятность неспособности системы предоставить базовую водоотдачу, связанную с определённым целевым попуском, по крайней мере, однажды на определённом временном отрезке.

Общепринятой является практика использования понятия интервалов повторяемости для количественной оценки риска отказа водоресурсной системы. Обычные интервалы повторения, связанные с большими системами: 1 в 20 лет, 1 в 50 лет, 1 в 100 лет и 1 в 200 лет. Вероятность отказа для конкретного года, ежегодный риск отказа, является обратной величиной к интервалу повторяемости. Таким образом, вероятность отказа 2 % в течение одного года эквивалентна интервалу повторяемости в 50 лет. Таким образом:

$$R = 1/T , \tag{4.4}$$

где R показывает ежегодный риск отказа и T указывает интервал повторяемости отказа.

Вероятность успешного удовлетворения потребностей в воде в конкретный год, годовая вероятность, это просто 1 минус ежегодный риск отказа. Поэтому ежегодная обеспеченность водоснабжения связана с интервалом повторяемости отказа следующим отношением:

$$r = 1 - 1/T , \tag{4.5}$$

где r — ежегодная обеспеченность водоснабжения.

Долгосрочный риск отказа связан с ежегодным риском отказа отношением вероятностей Бернулли:

$$R_n = 1 - (1 - R)^n = 1 - (1 - 1/T)^n , \tag{4.6}$$

где R_n — является долгосрочным риском отказа и n представляет планируемый период (длину ряда) в годах.

Хотя расчет риска отказа может быть сделан на основе анализа исторического ряда данных наблюдений за стоком, его надёжность, как правило, не очень высокая, за исключением разве что продолжительных рядов. Использование стохастически смоделированных рядов стока, следовательно, является средством удлинения выборки возможных последовательностей значений стока для получения более надежных статистических оценок.

4.2.5.3 Характеристики обеспеченности попуска-водоотдачи

Вероятностная оценка характерного поведения водоресурсной системы может быть выполнена с помощью анализа большого количества стохастически смоделированных рядов стока, как правило, от 200 до 2 000 рядов той же продолжительности, что и исторический ряд наблюдений.

Хотя были разработаны многие хорошо зарекомендовавшие себя стохастические гидрологические модели, необходимо провести обширные испытания и повторную выборку, для того чтобы установить для каждого пункта наблюдений основные параметры рядов фактических наблюдений, на которых калибруются модели. Проверки моделей особенно важны в полусухих и засушливых районах, где присутствует большая изменчивость стока.

Рисунок II.4.6 отражает добавление вероятностной информации на диаграмму отношения попуска и водоотдачи. Диаграмма Бокса-Вискера показывает выборочное распределение значений базовой водоотдачи,

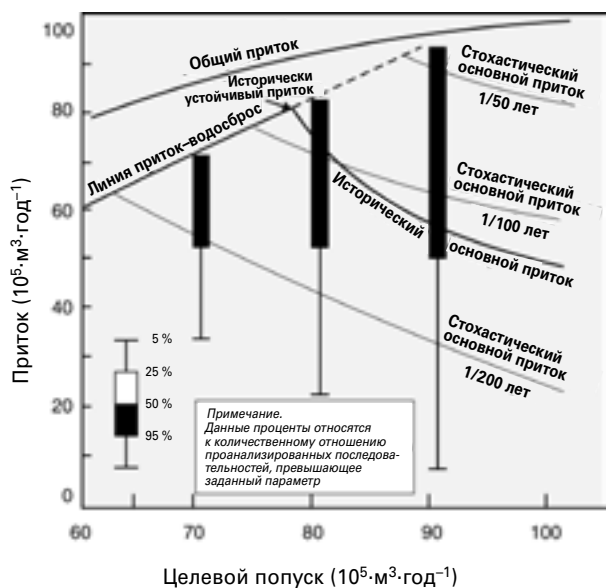


Рисунок II.4.6. Сравнение долгосрочных характеристик сработки

полученных из анализа большого количества созданных стохастических рядов, соответствующих целевым попускам 70, 80 и 90 млн м³ в год. Форма и достаточно крутой спад линии исторической базовой водоотдачи по сравнению с линией базовой водоотдачи вероятности 0,01 % связаны с особенностями конкретной конфигурации исторического критического периода, в то время как линия вероятностной водоотдачи отображает обобщенные результаты анализа большого количества рядов значений притока.

Для большей наглядности можно отобразить вероятностные характеристики попуска-водоотдачи, как показано на рисунке II.4.7. Эти кривые также могут служить основой для оценки и управления сложными каскадами водохранилищ, как это описано в последующих разделах.

Как видно из рисунка II.4.7, если от системы потребуется водоотдача 60 млн м³ в год с вероятностью риска отказа не больше одного раз в 100 лет, она может быть достигнута путем установления целевого попуска 82 млн м³ (см. пунктирную линию). Еще 22 млн м³ в год будет доступно с обеспеченностью примерно один раз в 80 лет. Дополнительная вода может быть использована там, где требуется меньшая степень надежности водоснабжения, например для генерации дополнительной энергии или для подпитки соседних систем водных ресурсов. Кроме того, водохранилище может быть уменьшено так, что чистая водоотдача 60 млн м³ в год может быть получена с вероятностью риска отказа один раз в 100 лет.

4.2.5.4 Краткосрочные вероятностные характеристики водоотдачи

Тогда как кривые обеспеченности водоотдачи позволяют оценить долгосрочные возможности систем водных ресурсов в отношении водоотдачи и представляют прогноз долгосрочного поведения систем, они не дают достаточно информации для принятия краткосрочных операционных решений. В этом случае наибольшую важность приобретает схема управления водохранилищем. Однако решения в отношении распределения воды в настоящем времени не могут основываться лишь на текущей ситуации, следует гарантировать водоснабжение и на какой-то период времени в будущем. Продолжительность этого периода гарантированного водоснабжения должна быть на несколько шагов по времени больше, чем шаг по времени между основными оперативными решениями.

Краткосрочные вероятностные характеристики попуска-водоотдачи разработаны таким же образом, как и долгосрочные кривые, за исключением того, что краткосрочные кривые также связаны с конкретными начальными характеристиками водохранилища. Поэтому кривые должны быть разработаны для диапазона начальных состояний водохранилища. Из-за более короткой продолжительности используемых рядов, как правило, от двух до пяти лет, многие ряды могут не охватывать критический период. Таким образом, с целью достижения сходимости должны быть проанализированы гораздо более короткие ряды, чем для долгосрочного анализа. Более подробную информацию о практическом применении краткосрочных кривых при реальном управлении системами водных ресурсов можно найти у Бассона и др. (Basson and others, 1994).

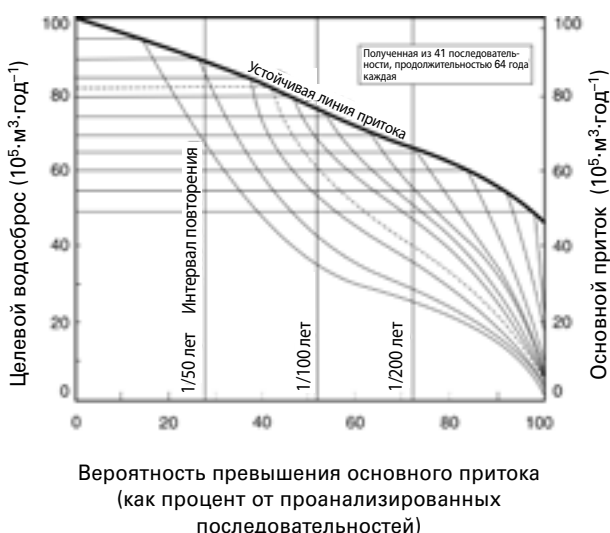


Рисунок II.4.7. Совокупность долгосрочных характеристик надежности притока-попуска

4.2.5.5 Время заполнения водохранилища

После строительства новой плотины, прежде чем водохранилище сможет обеспечить полную водоотдачу, должен быть достигнут определенный уровень его наполненности. В полувлажных и засушливых районах, а также там, где освоение водных ресурсов практически достигло максимума, первое заполнение водохранилища может занять несколько лет после его строительства, даже если воду из него не забирают в течение этого периода. Все это может оказать большое влияние на плановое поэтапное развитие, а также экономическую целесообразность проекта.

Вероятностные оценки времени наполнения новых водохранилищ могут быть получены путем определения графика емкостей водохранилища для большого числа стохастических рядов значений притока, начиная с пустого водохранилища. Должна быть выбрана практическая продолжительность времени анализа, в то время как могут тестироваться различные варианты поэтапного попуска воды из водохранилища. Рисунок II.4.8 показывает вероятностные оценки времени заполнения водохранилища.

4.2.6 Многоцелевые водохранилища и правила управления водохранилищами

Большинство водохранилищ предназначено для решения многих задач, перечисленных в разделе 4.1. Обычно нереально выделять определенную часть объема водохранилища для решения каждой отдельной задачи. В большинстве случаев такое целевое распределение объема ограничивается только аварийными ситуациями. Например, буферная зона чаще всего располагается непосредственно над зоной мертвого объема водохранилища и сохраняется для

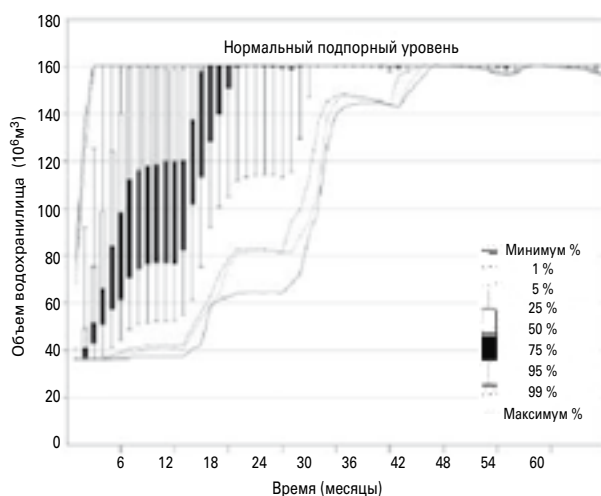


Рисунок II.4.8. Вероятностная оценка времени заполнения водохранилища

использования в исключительных обстоятельствах, таких как непредвиденные сбросы воды в нижний бьеф для разбавления случайных загрязнений, для аварийного водоснабжения населения в случае возникновения неожиданной опасности для здоровья, для противопожарных нужд. Однако большинство целей удовлетворяются за счет основной емкости водохранилища, что связано с разработкой сложных диспетчерских графиков его работы. Разным пользователям требуются различные количества воды в разное время и с разной обеспеченностью водоснабжения.

Попуски воды из водохранилища часто выражаются в виде кривых графика, которые определяют величину попусков в зависимости от имеющегося запаса воды в водохранилище и времени года. Разная обеспеченность водоснабжения также предполагает, что у разных категорий пользователей существует разная уязвимость на случай нехватки воды. Во многих странах мира разработка проекта водохранилища для постоянного и полного удовлетворения требований в воде неосуществима. В таком случае реализуют стратегии пошагового ограничения водоснабжения определенных пользователей, когда достигнуты критические уровни воды в водохранилище.

Некоторые виды использования водохранилища не требуют сброса или забора воды. Тем не менее должны соблюдаться определенные ограничения по объему водохранилища в определенное время года, которые могут повлиять на характеристики водоотдачи водохранилища или системы водных ресурсов, например, когда водохранилища используются для регулирования паводков, отдыха, регулирования засоления и решения экологических проблем.

Для проектирования и эксплуатации многоцелевых водохранилищ необходимо проведение комплексного анализа, который, как правило, осуществляется с помощью итерационных методов, включающих построение диспетчерских графиков и оценку экономической эффективности использования водохранилища для каждой индивидуальной цели, с целью улучшения всей системы управления водным хозяйством. Можно также использовать формальные методы оптимизации, чтобы найти лучшее компромиссное решение. Важно, чтобы все потенциальные виды использования водохранилища и его пользователи были учтены на этапах разработки проекта, а также, чтобы правила эксплуатации в режиме реального времени были рассмотрены еще до начала строительства. Там, где присутствуют многоцелевые водохранилища или сложные системы водных ресурсов (см. раздел 4.2.7), желательно, чтобы правила их эксплуатации были разработаны на стадии планирования.

Примеры диспетчерских графиков и правила управления в режиме реального времени могут быть найдены во многих работах (Box and Jenkins, 1970; Basson and others, 1994; Loucks and others, 1981, и Сванидзе, 1977).

4.2.7 Системы водных ресурсов с каскадом водохранилищ

Вследствие высокой степени освоения водных ресурсов во многих частях мира и устойчивого роста их освоения в других странах, появление каскада водохранилищ в бассейне становится все более и более распространенным явлением. Водоохранилища могут быть расположены друг за другом вниз по течению одной и той же реки или параллельно в отдельных рукавах реки, или в различных комбинациях в пределах водосбора реки. Водоохранилища в соседних водосборах также могут быть связаны друг с другом за счет перераспределения воды, в результате чего появляются большие и более сложные системы управления водными ресурсами, такие, как показано на рисунке II.4.9.

Там, где два или более водохранилища связаны друг с другом за счет расположения в пределах одной и той

же речной системы или за счет перераспределения воды, одно будет влиять на остальные пусть даже в отношении только совместного удовлетворения потребностей в воде на нижерасположенных по течению частях бассейна. Такие водохранилища по своей природе — части той же системы и должны быть признаны в качестве таковых при управлении водными ресурсами. Во многих случаях может потребоваться введение правил управления водохранилищами. Введение новых водохранилищ также должно быть оценено, а позднее они должны управляться в составе общей системы.

Там, где проекты изначально одиночных водохранилищ со временем развиваются в проект системы водохранилищ, эксплуатация существующих элементов их системы, возможно, подлежит изменению. Основные изменения часто трудно реализовать из-за многочисленных юридических, политических, экономических и физических ограничений. Соответственно, уровень оптимизации, который может быть достигнут на практике в таких случаях, как правило, низок.

Там, где изначально была заложена возможность введения в эксплуатацию новых водохранилищ,

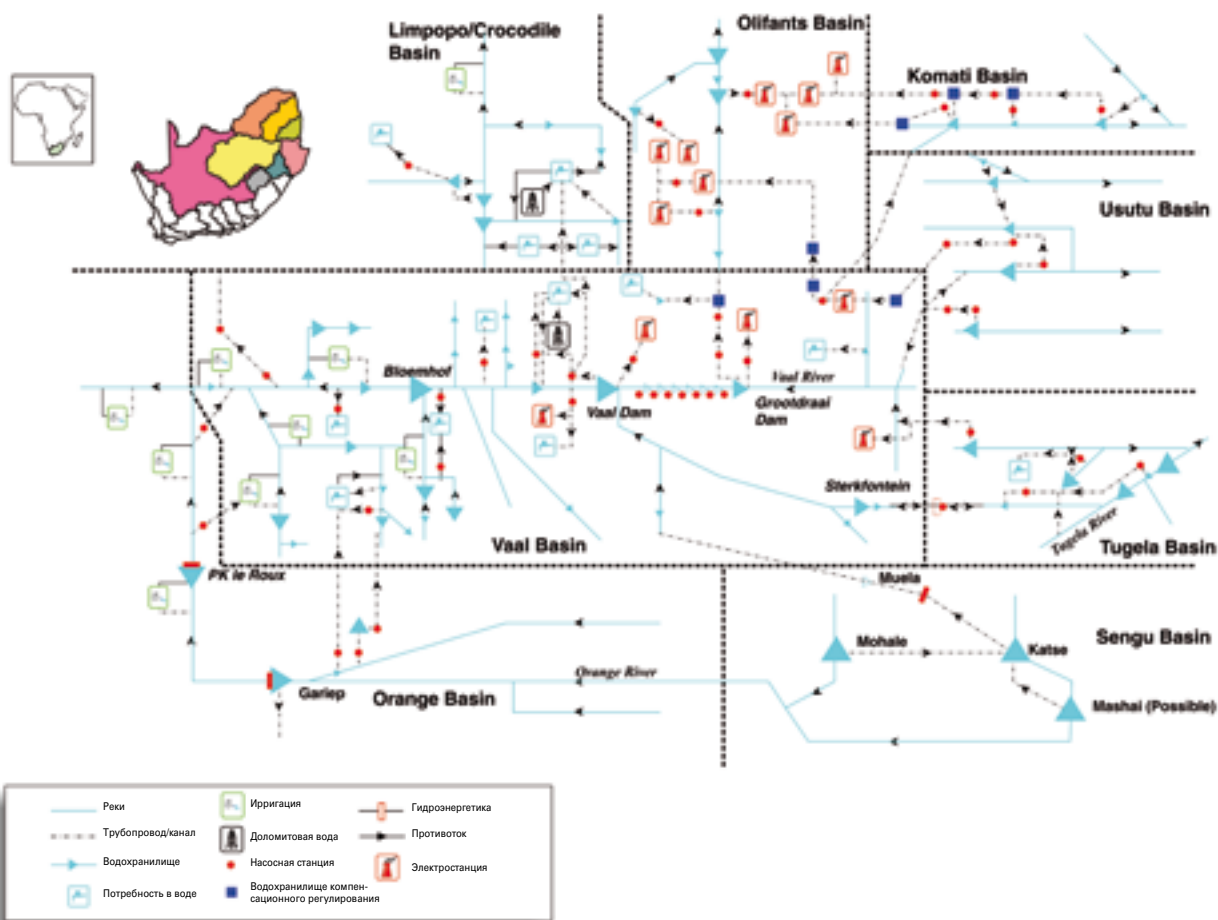


Рисунок II.4.9. Водохозяйственная система, состоящая из нескольких водохранилищ и простирающаяся на нескольких речных бассейнах

значительные преимущества могут быть достигнуты в ходе эксплуатации водохранилищ в качестве одной взаимосвязанной системы. Как правило, эффективность работы системы еще более усиливается там, где различные бассейны связаны друг с другом за счет перераспределения воды. Отдельные водохранилища или элементы системы могут, например, обеспечивать целевой попуск, который превышает фактическую водоотдачу водохранилища или подсистемы, и он может быть поддержан из других частей системы в течение периодов недостаточной водоотдачи. Таким образом, может быть получена общая отдача, которая больше, чем сумма значений фактической водоотдачи составных частей системы.

Настоятельно рекомендуется применять вероятностный подход при управлении системой из нескольких водохранилищ. Для этого необходимо смоделировать стохастические ряды стока для каждого пункта в системе. Особо важным в этой связи является сохранить взаимные корреляции между рядами наблюдений за стоком в соответствующих пунктах. Надежность управления системами водных ресурсов при вероятностном подходе зависит от точного воссоздания характеристик в созданных рядах.

Сложность вероятностного управления водными ресурсами как одной целостной системой всесторонне рассматривается в литературе. Очевидно, определение характеристик водоотдачи, а также оперативное управление системой водных ресурсов со многими водохранилищами, могут быть очень сложным процессом и в целом могут выполняться только с помощью сложных компьютерных моделей. Большая часть разработанных моделей может быть получена в соответствующих организациях или учреждениях, как правило, по лицензии или по соглашению. Можно связаться с Hatch Energy, Канада (www.hatchenergy.com); BKS Group (www.bks.co.za) и Департаментом водного и лесного хозяйства, ЮАР (www.dwaf.gov.za); Датским гидрологическим институтом, Дания (www.dhisoftware.com); Гидрологическим инженерным центром, Американский корпус военных инженеров (www.hec.usace.army.mil) и Deltares, Нидерланды (www.wldelft.nl).

4.2.8 Побочные эффекты от сооружения водохранилищ

В рамках данного раздела рассматривается общая информация о побочных эффектах от водохранилищ, однако без детального изучения вопроса. Раздел посвящен воздействию накопления воды в водохранилищах, созданных плотинами, а не прямому воздействию плотин или гидроэлектростанций, такому как, например, создание барьеров на пути миграции рыбы. Важные социальные последствия создания водохранилищ также здесь не рассматриваются.

4.2.8.1 Влияние на гидравлический и гидрологический режимы

В результате сооружения водохранилища изменяются гидравлический и гидрологический режимы нижнего бьефа. Использование воды потребителями снижает средний сток реки, в то время как в результате регулирования стока водохранилищем изменяется его сезонное распределение и обычно уменьшается изменчивость стока. Задержка воды в водохранилище создает условия для седиментации, в результате чего спускаемая вода обладает большей транспортирующей способностью, что может способствовать эрозии на участках нижнего бьефа. Уменьшение уклона реки может вызвать проблемы подтопления и осаждения наносов в русле реки, на участке выше водохранилища.

4.2.8.2 Влияние на окружающую среду

Воздействия на окружающую среду являются предметом все большего внимания при планировании и эксплуатации водохозяйственных объектов.

Создание водохранилищ обычно оказывает очень большое воздействие на экологические условия окружающей территории. В случае, когда объем водохранилища превышает объем годового стока и наблюдается высокое содержание питательных веществ в воде, значительную роль в формировании качества воды в нем может играть эвтрофикация из-за большой продолжительности водообмена. Водоохранилище оказывает большое влияние на температуру и содержание кислорода в сбрасываемой воде. Вода с меньшей мутностью вследствие отложения наносов позволяет свету проникать глубже, что может вызывать цветение водорослей. Регулирование стока будет также изменять характер землепользования и увеличивать использование воды на нижележащих участках. Увеличение водопользования обычно приводит к увеличению объема сточных вод, которые могут снижать качество воды в реках-приемниках.

Изменения такого характера являются основными при создании водохранилищ. Однако водохранилища вызывают также изменения, приводящие к положительному эффекту. Во многих случаях состояние окружающей среды вблизи водохранилищ и в нижнем бьефе значительно улучшается за счет проведения рекреационных, эстетических, экологических и санитарных мероприятий.

Прежде всего, важно постоянно оценивать все изменения факторов окружающей среды под воздействием водохранилища и обеспечить средства для мониторинга показаний окружающей среды как до, так и после строительства водохранилища.

4.2.8.3 Экологические требования к стоку

Для смягчения воздействия водохранилищ на водную флору и фауну ниже по течению, чтобы, по крайней мере, частично воссоздать некоторые черты естественного режима потока, необходимого для поддержания здоровых экосистем, делают специальные попуски. Такие попуски должны быть учтены на стадиях планирования проекта и определения характеристик водоотдачи системы водных ресурсов. Экологические требования к стоку реки могут существенно влиять на водозабор из системы, особенно там, где необходимо поддерживать здоровье экосистемы. Было отмечено несколько случаев, когда из-за растущего уровня информированности и понимания проблем окружающей среды, допустимый забор воды был существенно сокращен в пользу больших экологических попусков.

Определение экологических требований к воде представляет собой отдельную специальную область знаний и выходит за рамки данной главы (см. том I, глава 7, и главу 3 настоящего тома). Вместе с тем были разработаны методы, которые могут быть использованы специалистами-практиками для получения примерных экологических требований к воде для первоначальных целей планирования (Hughes and Hannart, 2003).

4.2.8.4 Другие воздействия

Воздействие подпора, вызываемого аккумуляцией воды в водохранилище, а также изменения уровня воды в водохранилище, которые могут быть вызваны наводнениями, ветровым нагоном, действием волн и сейшей, могут быть отражены в краткосрочных изменениях водобалансовых расчетов. Однако эти воздействия связаны, главным образом, со строительством и безопасностью плотины, а также безопасностью людей и водохозяйственными объектами в непосредственной близости от водохранилища, и поэтому не рассматриваются в этом разделе.

4.2.9 Оценка емкости водохранилища методами дистанционного зондирования

Определение границ поверхностных водных объектов и запасов поверхностных вод, в т. ч. озер, прудов и водохранилищ, исторически производилось с использованием методов дешифрирования карт и снимков, но в последнее время используются и цифровые мультиспектральные данные. Эти данные могут быть подвергнуты автоматизированному анализу, чтобы добиться повторных, быстрых результатов, которые во многих случаях соответствуют требуемой точности. В общем точность обнаружения и измерения водных объектов в значительной степени зависит от точной

идентификации воды и пространственного разрешения датчика. Проблемы идентификации связаны с путаницей участков земной поверхности, аналогичных по визуальным характеристикам, таких как тени облаков, темные почвы и городские районы. Однако дешифрирование аэрофотоснимков позволяет свести эти ошибки к минимуму и проверить первичные результаты. Таким образом, для целей весьма точных работ аэрофотосъемка по-прежнему является наилучшим источником данных. Спутниковые данные также представляют собой хорошую основу для определения морфометрических параметров, таких как длина, ширина и площадь поверхности воды для различных высот, если разрешение соответствует конкретному использованию.

Для дистанционного зондирования вода обладает относительно низкой отражательной способностью, особенно вблизи инфракрасной и видимой части электромагнитного спектра. Это помогает разделять городские районы, поля и иногда тени облаков, и неясности, созданные изменениями прозрачности атмосферы (Engman and Gurney, 1991). Использование данных картопостроителя с его 30-метровым номинальным разрешением увеличивает эту точность. Кроме того, данные спутниковой системы SPOT имеют повышенную точность.

Дистанционное зондирование, по большей части, позволяет определить только площадь водной поверхности и не дает измерить объем напрямую. Карта поверхности воды может быть использована для оценки объема воды в водохранилище. Методы, которые используются для оценки объема озера, зависят от эмпирического соотношения между площадью поверхности или протяженностью береговой линии и объемом воды. Можно установить отношение площадь-объем или можно использовать топографические характеристики для оценки уровня воды в водохранилище, а затем установить связь между уровнем воды и объемом. Государственные организации могут использовать этот подход не только, чтобы дополнить данные по водохранилищам, с которыми они работают, но и для получения информации о водоемах, которые они не контролируют, но которые могут повлиять на их собственные стратегии управления в экстремальных условиях, таких как крупные наводнения. Эти методы четко требуют данных высокого пространственного разрешения, за исключением экстремальных условий наводнения (Engman and Gurney, 1991).

4.2.10 Изменение климата

Становится все более очевидным, что глобальная температура повышается и что темпы такого повышения могут быть существенно больше, чем в прошлом

(МГЭИК, 2001 г.). Некоторые модели глобальной циркуляции предполагают, что повышение температуры может вызвать изменения количества годовых осадков и привести к изменениям климата в некоторых регионах. Анализы сценариев оценки потенциального воздействия изменения климата на сток показывают, что в некоторых областях сток может снизиться на 10 процентов к 2015 г. (Schulze and Perks, 2000).

Такие изменения климата сильно повлияют не только на характеристики водоотдачи системы водных ресурсов, но также на потребности в забираемой из системы воде. Поэтому стоит предусмотреть вероятность изменения климата и выполнить анализ сценариев для уязвимых районов, с тем чтобы оценить потенциальное воздействие, которое окажет изменение климата. Хотя разумно рассматривать потенциальные последствия изменения климата при долгосрочном планировании системы водных ресурсов, следует найти баланс между подготовленностью и возможной чрезмерной реакцией для предотвращения напрасной траты ценных ресурсов.

Анализы чувствительности, нацеленные на определение того, как изменение климата повлияет на характеристики водоотдачи систем водных ресурсов, могут быть выполнены пошаговым изменением среднего и/или стандартного отклонения искусственного ряда стока. Признаки того, что можно рассматривать как реалистичную степень таких изменений, могут быть выведены из анализа сценариев с помощью моделей глобальной циркуляции, но они, вероятно, в значительной степени остаются предметом субъективного суждения.

4.3 РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАВОДКОВ [ГОМС 181, J04, J10, J15, K10, K15, K22, K45]

4.3.1 Общие положения

Паводок — это «повышение, как правило кратковременное, уровней воды водотока до максимальных значений с последующим понижением уровня более медленными темпами» (ЮНЕСКО/ВМО, 1992). При некоторых паводках водные потоки или другие водные объекты выходят из своих привычных границ, что приводит к затоплению районов, которые обычно не находятся под водой. Паводки, высокие или низкие, являются характерной чертой естественного водного режима и, как правило, представляют собой результат сложного взаимодействия случайных природных процессов, таких как выпадение осадков и ход температур, с характеристиками бассейна или водосбора. В целом величину паводка определяют следующие факторы:

- a) объем, пространственное распределение, интенсивность и продолжительность выпадения осадков или снеготаяния на водосборе;
- b) состояние водосбора и погодные условия перед случаем выпадения осадков;
- c) характеристики подстилающей поверхности, такие как землепользование, рельеф и т. д.;
- d) пропускная способность водотока (в том числе в случае заторов льда или скопления бревен в русле);
- e) воздействие приливных и штормовых нагонов.

Поймы имеют много преимуществ с точки зрения размещения населенных пунктов и социально-экономического развития из-за их близости к рекам, которые формируют плодородные почвы, значительные запасы воды и служат транспортными артериями. Паводки пополняют влагозапас заболоченных земель, значительно увеличивают запасы подземных вод, а также поддерживают рыбное хозяйство и сельскохозяйственные системы, тем самым добавляя привлекательности поймам как местам размещения населенных пунктов и ведения экономической деятельности. В то же время опасность паводков оказывает самое неблагоприятное воздействие на экономику и безопасность людей. Паводки продолжают лидировать среди всех стихийных бедствий как по числу пострадавших от них людей, так и по наносимому ими размеру экономического ущерба (Munich Re, 2006). Человечество ведет борьбу с этим опасным природным явлением на протяжении всей истории человеческих поселений. В течение последних десятилетий эта борьба постепенно переходит от контроля над паводками к их регулированию. В этой главе дается обзор мер, которые могут быть предприняты для смягчения негативных последствий паводков с помощью пойм.

4.3.2 Стратегии регулирования паводков

Противопаводковый контроль — особый процесс обеспечения и управления структурами, предназначенными для устранения или минимизации разрушительных последствий паводков, путём задержки, сдерживания или отклонения вод паводка до экономически обоснованного предела (ICID, 1996; Framji and Garg, 1978). Регулирование паводков относится к общему процессу предотвращения и смягчения масштабов паводков и уменьшения связанных с ними рисков на основе комплексного подхода. Риски паводков, то есть ожидаемые потери от паводков, имеющие место в течение определенного периода времени, представляют собой комплекс следующих факторов:

- a) степень опасности паводков, выраженная через частоту и силу (глубину затопления и соответствующие ему скорости);
- b) воздействие паводков на человеческую деятельность;
- c) слабые, подверженные риску места.

Обеспечить абсолютную защиту от паводков районов, подверженных их воздействию различной интенсивности, не представляется возможным ни с практической, ни с экономической точки зрения. Таким образом, на практике регулирование паводков будет заключаться в обеспечении достаточной степени защиты от опасности паводков при приемлемой экономической стоимости путем сочетания мер строительного и иного характера. В течение многих лет меры противопаводкового регулирования играют важную роль в обеспечении безопасности как людей, так и социально-экономического развития. Однако в течение последнего десятилетия или около того эти меры были дополнены мерами, не связанными со строительством сооружений, такими как прогнозирование паводков и регулирование землепользования под влиянием очевидной необходимости перейти от парадигмы контроля над паводками к их регулированию.

Существуют четыре основные стратегии регулирования паводков, направленные на снижение их рисков:

- a) изменение характеристик паводка;
- b) изменение восприимчивости общества к ущербу от паводков;
- c) сокращение убытков на душу населения;
- d) несение ответственности за убытки.

Методы преобразования паводков направлены на изменение объема стока, времени достижения пика паводка, его продолжительности, масштабов территории, подверженной паводкам, скорости и глубины паводковых вод и/или количества осадков и загрязняющих веществ, переносимых паводком. Эти методы включают в себя защиту от паводков средствами физического контроля, такими как плотины и водохранилища, дамбы и насыпи, изменения русла и отведение потока, мероприятия на водосборе.

Для снижения подверженности ущербу экономической деятельности, в частности некоторых ее видов, сосредоточенных в поймах рек, могут быть проведены определенные мероприятия. К ним относятся регулирование землепользования, защита от паводков, прогнозирование паводков и предупреждения об опасности паводков.

Сокращение убытков достигается в ходе действий, направленных на изменение объема убытков на душу населения, либо распределением общего объема убытков на часть общества, которая больше той, которая непосредственно пострадала от паводка, либо более равномерным распределением убытков во времени. Такова стратегия сокращения убытков через принятие запланированных мер по оказанию помощи отдельным лицам и обществу в период подготовки к паводку, при его прохождении и в ходе ликвидации последствий. Такими мерами являются готовность к чрезвычайным

ситуациям, эвакуация, борьба с паводком, восстановление после него и программы страхования (эти меры дополняют те, что уже обсуждались в двух предыдущих параграфах).

«Несение ответственности за убытки» подразумевает продолжение проживания в условиях угрозы наступления паводков. При внимательном рассмотрении, с точки зрения затрат и выгод всего спектра действий, предпринимаемых в ответ на паводки, «несение ответственности за убытки» часто может оказаться наиболее приемлемым решением.

Разработка политики, стратегий и планов по борьбе с рисками, связанными с паводками или любыми другими стихийными опасными явлениями, должна быть основана на комплексной оценке рисков. Это требует комплексного подхода, при котором должен быть рассмотрен широкий спектр мер регулирования паводков. Необходимо рассмотреть общую ситуацию, сравнить имеющиеся варианты и выбрать стратегию, которая является наиболее подходящей для конкретной ситуации. Признавая преимущества и недостатки различных строительных и иных мер, необходимо оценить, принять и реализовать оптимальное сочетание обоих типов мер. Например, возведение дамбы в одной части города уместно дополнить корректировками землепользования на не защищенном от паводков участке долины реки и строительными работами на редко застроенной территории; а противопаводочный контроль, осуществляемый с использованием резервуаров-водоприемников, может сочетаться с регулированием землепользования.

4.3.3 **Комплексное регулирование паводков**

Традиционно регулирование паводков включало преимущественно защитные мероприятия. Однако в настоящее время широко признана необходимость перехода от защитных действий к активному управлению рисками. Комплексное регулирование паводков, предназначенное для интеграции освоения земли и водных ресурсов в бассейне реки в контексте комплексного управления водными ресурсами, направлено на такое регулирование паводков, которое позволит максимально увеличить чистую выгоду от использования пойм при сведении к минимуму гибели людей в результате паводков (WMO, APFM, 2004). Таким образом можно принимать случайные потери от паводка в перспективе долгосрочного увеличения эффективности использования районов, подверженных паводкам. Комплексное регулирование паводков включает пять задач:

- a) уделение внимания гидрологическому циклу в целом и на суше;
- b) интеграция управления земельными и водными ресурсами;

- с) принятие наилучшего сочетания стратегий;
- д) обеспечение подхода, предполагающего совместное участие;
- е) принятие комплексных подходов к решению проблеме, связанных с опасными явлениями.

Для детального рассмотрения этих задач просьба обращаться к ВМО (ARFM, 2004).

Для регулирования паводков в контексте комплексного управления водными ресурсами бассейны рек следует рассматривать как комплексные системы. Разносторонние меры включают, например, социально-экономическую деятельность, способы ведения землепользования, гидроморфологические процессы, повышение уровня осведомленности общественности, просвещение, коммуникацию и участие заинтересованных сторон в транспарентном процессе принятия решений. Эти меры рассматриваются в качестве составных частей систем, которые надлежащим образом встроены в мероприятия, не связанные со строительством сооружений.

Регулирование паводков является междисциплинарной задачей, решение которой касается различных секторов экономики, ведомств и учреждений, могущих оказать влияние на масштабы паводков, а также на реализацию мер борьбы с паводками. Поэтому установление связей между различными соответствующими секторами становится очень важным аспектом, а ключевым моментом являются сотрудничество и координация, выходящие за рамки институциональных границ. Хотя сфера полномочий многих учреждений распространяется только на часть речного бассейна или на один сектор, полномочия других могут распространяться далеко за пределы границ бассейна. Эффективная коммуникация, преодолевающая административные и дисциплинарные границы, лежит в основе интеграции, которая может иметь место только тогда, когда есть четкое понимание общих целей. Акцент, таким образом, должен быть сделан на принятии гибкой стратегии, подходящей каждому из подвергающихся паводкам регионов, характеризующихся различными физическими, социальными, культурными и экономическими условиями. Кроме того, важно оценить различные варианты стратегий и их относительные преимущества и недостатки.

Гибели людей можно избежать при своевременном обеспечении населения пойменных регионов достаточно точными и надежными прогнозами. Однако это необходимо поддерживать соответствующими мерами обеспечения готовности и механизмами реагирования, направленными на обеспечение эвакуации людей из зон, находящихся под угрозой. Карты территорий, подверженных риску паводков (также известные как карты паводков), карты рисков паводков или

карты зонирования пойм показывают районы, которые могут быть затоплены с заданной вероятностью и позволяют выпускать долгосрочные заблаговременные предупреждения, на основании которых граждане сами принимают решения о том, где жить и инвестировать ли в поймы (WMO, 2006a). Подобные средства играют важную роль в повышении информированности различных участвующих сторон о степени опасности наводнений и помогают им в организации ответных действий на паводки. Зонирование пойм, которое может быть следующим шагом, может иметь большое значение, но оно, кроме того, имеет свои ограничения из-за трудностей обеспечения соблюдения соответствующих правил и положений — в частности, в развивающихся странах с большой нагрузкой, связанной с ростом населения.

4.3.4 Меры, связанные со строительством сооружений

4.3.4.1 Расчётные паводки

Паводок, называемый расчетным, представляется в виде гидрографа паводка или максимального мгновенного расхода, принимаемого при проектировании гидротехнического сооружения или регулировании стока реки с учетом экономических и гидрологических факторов. Это максимальный паводок, при котором проектируемое сооружение может безопасно эксплуатироваться, и его выбор предполагает выбор критериев безопасности и расчетную величину паводка, отвечающую этим критериям. Этот вопрос подробно рассматривается в разделе 5.10.

Хотя противопаводочное сооружение предназначено для регулирования будущих паводков, его проектирование, как правило, основывается на анализе ранее имевших место паводков. Однако такая экстраполяция имеющихся гидрологических рядов в будущее может быть не всегда уместной в связи с изменением метеорологических условий или изменениями гидрологического отклика бассейна. Антропогенные воздействия в связи с ростом населения и повышением уровня жизни могут привести к более интенсивной застройке земельных участков. Расширение и интенсивное освоение урбанизированных территорий часто способствуют увеличению объемов и расходов поверхностного стока и переносу наносов. Обезлесение может привести к увеличению твердого стока и деградации речной морфологии. Лесные угодья могут быть преобразованы в сельскохозяйственные поля, в результате чего улучшается дренирование этих земель. Оценка влияния гидрологических изменений на расположенной выше по течению части бассейна на риск паводка в нижнем течении реки может быть выполнена с помощью детерминированных гидрологических моделей (см. главу 6).

Ряд исследований потенциального воздействия изменения климата на наводнения был проведен в рамках работы Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2007). В настоящее время невозможно предсказать потенциальный рост пиковых паводков, связанный с изменением климата, для конкретных бассейнов со степенью уверенности, необходимой для включения их в процесс планирования и проектирования. Однако адаптивные методы управления, такие как пересмотр критериев для определения высоты надводной части дамб и других сооружений или разумное изменение функционирования структур контроля позволяют приспособиться к потенциальному увеличению повторяемости экстремальных явлений вследствие изменения климата.

4.3.4.2 Водохранилища для удержания паводков

Выход реки из берегов, вызывающий затопление, обычно продолжается недолго даже во время сезона паводков. Высокие паводки вызываются сильными ливнями, обусловленными экстремальными метеорологическими системами, такими как циклоны и интенсивные муссоны, и спадают достаточно быстро. В зависимости от характеристик водосбора и направления движения ливня, вызванные ими колебания расхода паводка, за которым следует относительно сухой период, могут быть с успехом использованы для регулирования паводков во время высокого расхода с помощью различных хранилищ. Обычно вода запасается выше плотины, однако для создания запасов воды могут быть использованы резервуары, расположенные в поймах.

4.3.4.2.1 Емкость водохранилища для приема паводкового стока

Размер ёмкости, который должен быть обеспечен в водохранилище для аккумуляции паводковых вод, зависит от следующих факторов.

- Объём, максимальный расход и продолжительность паводка, другие характеристики потока выше по течению, которые необходимо регулировать;
- Требования к характеристикам водохранилища, позволяющим удовлетворить различный спрос на воду;
- Пропускная способность русла ниже по течению;
- Необходимая степень регулирования паводка.

Если сезонная изменчивость паводков высока и наблюдаются они только в течение определенного сезона, водохранилища, помимо регулирования паводков, могут удовлетворять спрос различных водопользователей, т. е. иметь многоцелевое назначение. В этом случае вместимость водохранилища устанавливается в соответствии с требованиями этих водопользователей при

фиксированном объеме хранилища, предназначенного специально для снижения паводков во время сезона паводков. В таких случаях водохранилище срабатывает до сезона паводков и наполняется в течение этого сезона. Сбережение стока паводков осуществляется в проточных и непроточных водохранилищах. В случае невозможности создания таких специализированных хранилищ некоторое ослабление паводков может быть достигнуто за счет тщательно разработанного регулирования эксплуатационного режима водохранилищ.

Применение резервуаров многоцелевого назначения так же рассматривается в разделе 4.2.6.

4.3.4.2.2 Вопросы, связанные с проектированием

Срезка паводка достигается задержанием и накоплением части паводковых вод в водохранилище. Требуемая для срезки паводка ёмкость, или противопаводочная ёмкость водохранилища, определяется обычно как та часть объема водохранилища, которая может обеспечить определенное снижение пика паводка заданной величины или заданной повторяемости. Различаются следующие три основных типа противопаводочной ёмкости:

- регулируемая ёмкость проточного или непроточного водохранилища;
- нерегулируемая ёмкость проточного водохранилища;
- нерегулируемая ёмкость непроточного водохранилища.

Объем ёмкости, необходимой для достижения заданного эффекта, будет зависеть от типа противопаводочной ёмкости. Влияние на срезку паводка каждого типа противопаводочных ёмкостей показано на рисунке II.4.10 ниже и описано в последующих подразделах. В реальной практике эффект регулирования паводочного стока водохранилищем достигается обычно сочетанием регулируемой и нерегулируемой ёмкостей.

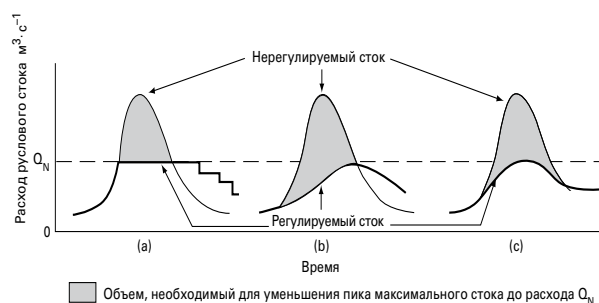


Рисунок II.4.10. Влияние водохранилищ на максимальный сток — регулируемое хранилище (а), нерегулируемое проточное хранилище (б) и нерегулируемое непроточное хранилище (с)

4.3.4.2.3 **Регулируемая ёмкость для задержания паводка**

Полный контроль над задержанием паводочной волны противопаводочной ёмкостью водохранилища обеспечивает самую высокую эффективность снижения паводка, т. к. начать накопление воды в этом случае можно только после того, как наибольший допустимый расход (называемый также безопасным расходом) будет достигнут в створе плотины. Таким образом, задерживается только та часть водной массы, которая может причинить ущерб.

Полный контроль над накоплением воды достигается регулированием водопропускных отверстий, имеющих затворы на водохранилищах речного типа. Водоохранилища речного типа осуществляют полный контроль над паводком только в тех случаях, если водослив имеет пропускную способность, достаточную для сброса безопасных расходов при минимальной противопаводочной ёмкости, и сбросы воды из противопаводочной ёмкости могут быть полностью регулируемы. На водохранилищах долинного типа полный контроль паводка достигается в тех случаях, если пропускная способность подводящих устройств, достаточная для предотвращения возрастания расходов на нижерасположенных участках, выше безопасного расхода и если попуски накопленной воды могут регулироваться.

Расчетный паводок для определения размеров противопаводочной ёмкости водохранилища должен быть таким же, каким он принят для расчета водосливов, хотя требования к безопасности самой плотины обычно отличаются от требований обычной защиты от паводков на нижерасположенных участках.

4.3.4.2.4 **Нерегулируемая ёмкость для задержания паводка водохранилищ речного типа**

Ёмкость водохранилища выше гребня фиксированного водослива обычно считается нерегулируемой при проектировании, хотя она может частично регулироваться попусками воды через водопропускные отверстия с затворами или через турбины. Однако при проектировании нерегулируемой противопаводочной ёмкости попуски либо принимаются постоянными в период пропуска паводка, либо считается, что водосбросы закрыты. Первое условие обычно принимается при оценке влияния нормального противопаводочного режима водохранилища на условия в нижнем бьефе, в то время как второе — для оценки безопасности самой плотины.

Нерегулируемая ёмкость для задержания паводка играет важную роль в предотвращении прорыва

плотины. Ее проектирование тесно связано с проектированием водопропускных отверстий плотины и должно быть основано на том же расчетном паводке, который принимается при расчете водосливов. Из соображений безопасности при проектировании водосливов принимается, что водохранилище полностью заполнено до гребня водослива к началу расчетного паводка.

Сравнение приведенных на рисунке II.4.10 условий (а) и (б) показывает, что нерегулируемая ёмкость менее эффективна при срезке паводка, чем регулируемая. Это объясняется тем, что нерегулируемая ёмкость начинает наполняться до того, как это требуется.

4.3.4.2.5 **Нерегулируемая ёмкость для задержания паводка непроточных водохранилищ**

Этот тип противопаводочной ёмкости создается на непроточных водохранилищах, иногда называемых «польдерными» из-за того, что их конструкция напоминает реальные польдеры. Такие водохранилища сооружаются ограждением части заливаемой поймы плотиной, гребень которой со стороны реки имеет пониженный участок, т. е. порог. Когда уровень воды в реке поднимается выше порога, то польдер начинает наполняться в результате переливания воды через порог. Тот факт, что водохранилище имеет обводные каналы, делает нерегулируемую противопаводочную ёмкость приречного типа более эффективной по сравнению с речной, поскольку наполнение излишними водами начинается позже (см. части (б) и (с) на рисунке II.4.10).

4.3.4.2.6 **Учет режима эксплуатации водохранилищ для проектных целей**

Ёмкость для задержания паводка чаще всего предусматривается в проточных водохранилищах многоцелевого назначения, имеющих водосливы с затворами, которые обеспечивают высокую степень регулирования. В таких водохранилищах всегда предусматривается некоторый нерегулируемый объем для задержания паводка и во многих случаях также часть регулируемого объема, сохраняемого для задержания паводка. Кроме того, ёмкости, предназначенные для других целей, время от времени могут быть использованы в целях регулирования паводка. Такое разнообразие целей, для которых создается водохранилище, допускает большую гибкость и ставит срезку паводка в сильную зависимость от режима эксплуатации водохранилища. Следовательно, в таких случаях необходимо выполнить детальный анализ режимов эксплуатации водохранилища на ранних стадиях проектирования, т. к. его результаты могут повлиять на выбор расчетных переменных.

Контролируемые водохранилища управляются в соответствии с эксплуатационным режимом или набором диспетчерских графиков с целью накопления в течение стадии подъема паводка части его объема, превышающей определенный безопасный объем. Когда ёмкость полностью использована, и в зависимости от притока, увеличивается сработка для обеспечения того, чтобы проектные уровни водохранилища не были превышены. После этого задержанные паводковые воды сбрасываются таким образом, чтобы опустошить резервуар в течение определенного времени, с тем чтобы он был готов к заполнению водами очередного паводка. При этом скорость сброски, по возможности, сохраняется на безопасном для нижнего бьефа уровне. Такое мероприятие должно сопровождаться оповещением о паводках общин, проживающих на территориях ниже по течению.

При использовании водохранилищ многоцелевого назначения интересы различных групп водопользователей, таких как ирригация, выработка гидроэлектроэнергии и противопаводочный контроль, обычно противоречат друг другу даже тогда, когда водохранилище является собственностью одного государства или компании. Такой конфликт может усугубиться, когда в него вовлечено несколько стран. Для целей ирригации и гидроэнергетики обычно требуется как можно более быстрое заполнения водохранилища и сохранение запасов воды на максимально высоком уровне. Для осуществления противопаводочного регулирования уровни водохранилища должны быть как можно более низкими, и после паводка оно должно освобождаться как можно быстрее, чтобы быть готовым к задержанию воды во время следующего паводка. Водохранилище является более эффективным с точки зрения регулирования паводков, если, кроме ёмкости водохранилища, выделяется дополнительное пространство для задержания паводков, не используемое в других целях. Таким образом, многоцелевое использование водохранилищ предполагает компромисс, который неизбежно приводит к меньшей, чем максимально возможная, выгоде любого отдельного водопользователя, но при этом обеспечивается максимальная эффективность эксплуатации водохозяйственного объекта в целом (см. раздел 4.2.6.).

Наличие точных и своевременных прогнозов притока имеет большое значение для оптимизации общей полезности водохранилища. В частности, это будет иметь большое значение для прогнозирования наступления двух или более паводков, следующих друг за другом, и, следовательно, возможности того, что объем задержания, заполненный одним паводком, может не успеть опорожниться до начала следующего паводка. Если такие прогнозы отсутствуют или неудовлетворительны, эффективность многоцелевого функционирования водохранилища может

быть снижена и осуществление противопаводочного регулирования будет ограничено.

Постоянное и эффективное регулирование паводков с помощью водохранилищ в течение многих лет способствует возникновению ложного чувства безопасности у населения территорий, расположенных ниже плотины. Это может привести к попыткам освоения пойменных и прибрежных земель и, в свою очередь, вызвать снижение пропускной способности русла в нижнем течении реки. Такая ситуация может привести к серьезному ущербу при высоких паводках, когда из водохранилища должен быть спущен значительный объем воды. Сброс необходимо выполнять расходами, не превышающими значение расчетного расхода, обеспечивающего противопаводочную защиту ниже по течению, чтобы сохранить русло реки и сдержать поступление вод на поймы. Такие попуски должны предваряться соответствующими предупреждениями.

Вот почему крайне важно разработать и использовать определенные диспетчерские графики или существующие методики управления водохранилищем многоцелевого назначения в целях обеспечения максимальной эффективности от эксплуатации водохозяйственного объекта, обеспечивая при этом безопасность строений и населения в нижнем бьефе.

4.3.4.2.7 **Влияние отложения наносов**

Отложение наносов в водохранилище снижает его регулируемую способность и тем самым эксплуатационные показатели. Проектное решение конструкции водохранилища должно предусматривать выделение части его ёмкости для отложения наносов, чтобы предотвратить преждевременное уменьшение полезного объема. Однако этот расчетный объем может оказаться недостаточным, что серьезно повлияет на объем хранилища, предназначенный для задержания паводков. Процесс отложения наносов, в первую очередь, затрагивает верхний бьеф водохранилища. Таким образом со временем снижается способность водохранилища понижать паводки. Это должно учитываться при долгосрочном планировании мероприятий по защите от паводков, чтобы могли быть разработаны своевременные альтернативные меры и предусмотрены соответствующие уровни защиты установки (см. раздел 4.2.2.2.).

4.3.4.3 **Другие меры, связанные со строительством сооружений**

4.3.4.3.1 **Обходные и водоотводящие каналы**

Для поддержания расхода воды в нижнем бьефе в пределах пропускной способности речной системы может быть использован отвод воды. Поток может быть

отведен полностью или частично в природный или искусственно созданный канал, расположенный в пределах поймы или, в некоторых случаях, за ее пределами. Водоотводящие каналы могут направлять воду из одной реки в другую, в понижение земной поверхности или в море, либо она может быть возвращена в русло той же реки на некотором расстоянии ниже по течению. Отвод паводковых вод из одной реки в другую влечет следующие гидрологические исследования:

- a) определение гидрографов паводочного стока для обеих рек;
- b) выделение на гидрографе части стока, которая будет отводиться;
- b) расчет трансформации перебрасываемого стока в канале переброски;
- c) наложение перебрасываемого стока на паводки, которые могут сформироваться в реке-приемнике;
- d) оценка повторяемости паводков в новых условиях на нижних участках обеих рек.

Особое внимание должно быть уделено оценке паводков в реке-приемнике, формирующихся в результате наложения двух сдвинутых по фазе исходных паводков, так же как и влиянию подпора, который может приводить к возрастанию опасности паводков на участке, расположенном выше места соединения отводящего канала с рекой-приемником.

4.3.4.3.2 **Улучшение дренажной системы и преобразование русла**

Скопление поверхностных дренажных вод в связи с неудовлетворительностью естественных или искусственных дренажных систем приводит к наводнениям в районах с умеренным уклоном поверхности земли. В таких случаях эффективное регулирование паводков может быть достигнуто за счет увеличения мощности существующего дренажного канала или путем создания дополнительных каналов для ускоренного удаления паводковых вод. Преобразование русла обычно нацелено на увеличение его пропускной способности за счет углубления и расширения, спрямления меандр и сокращения длины русла, а также расчистки и возможного спрямления в целях снижения сопротивления движению воды. Результатом этих мероприятий является увеличение скорости потока и снижение уровня воды в пределах участка, а также понижение паводка в пределах преобразованного участка.

Это приводит, в свою очередь, к увеличению размеров пиковых паводков на нижерасположенном участке. Влияние преобразования русла лучше всего оценивать гидравлическими методами трансформации стока (раздел 6.3.6), обращая внимание на взаимодействие паводков, формирующихся в главном русле и на

нижерасположенных притоках. Вероятность увеличения силы и длительности паводков ниже по течению должны рассматриваться при планировании подобных схем с помощью гидравлического моделирования всей дренажной системы (раздел 6.3.6). Побочное влияние преобразования русла проявляется в увеличении отложений наносов ниже по течению.

Противоположных эффектов можно достичь за счет снижения пропускной способности русла различными регулирующими сооружениями, которые, затрудняя течение, способствуют увеличению паводков на верхних участках и их снижению на нижерасположенных участках.

4.3.4.3.3 **Дамбы и защитные стенки**

Старинным, наиболее распространенным и быстро возводимым средством защиты от паводков, которое во многих случаях экономически оправдано, является система насыпных дамб, также называемых насыпями или плотинами. Такие дамбы строятся либо на берегах рек параллельно направлению течения реки или на окружающих прибрежных территориях, с тем чтобы они могли служить в качестве искусственных высоких берегов рек во время паводков и предотвращать затопления. Противопаводочные насыпные дамбы сооружаются в основном из песка и должны быть устойчивыми к гидростатическому давлению паводков, эрозии, последствиям прорыва труб и фильтрации. Этого можно достичь путем строительства дамб с широким основанием. В результате даже умеренно высокие дамбы занимают в основании большую площадь и с точки зрения стоимости земли могут быть непомерно дорогостоящими в городских и промышленных районах. В развитых районах, где нет обширных участков свободных земель или земля слишком дорога для использования ее для возведения из нее насыпи, более экономичным, социально приемлемым вариантом может оказаться строительство защитных стенок из бетона или применение каменной кладки. Иногда для защиты дамб от затопления в сочетании с ними необходимы такие работы по регулированию речных русел как применение шпор, обвязок или облицовки откосов. Для осуществления надлежащего проектирования насыпной дамбы необходимо уделить внимание следующим факторам:

- a) расположение насыпной дамбы;
- b) уровни расчётных паводков;
- c) расчетные уровни надводных бортов;
- d) конструктивные особенности дамб;
- e) вид и расположение шлюза дренажа.

Высота системы насыпных дамб определяется таким образом, чтобы обеспечить рассматриваемую область определенной степенью защиты в соответствии с экономической ценностью охраняемых районов,

и в зависимости от местных или национальных решений относительно того, что рассматривается в качестве приемлемого риска. Для получения дополнительной информации о риске см. разделы 4.2.5.2 и 5.10.8. Обычно проект выбирается с точки зрения обеспечения защиты от расчётных паводков с заданной вероятностью возникновения в течение определенного периода, например 1-, 10-, 25-, 50-, 100- или 1 000-летнего паводка. Расчетные уровни воды должны быть оценены на базе гидравлических условий всего бассейна. На реках, где в результате деятельности человека нарушен водный режим (водохранилища выше по течению, дамбы или плотины), расчетный уровень воды следует оценивать на базе гидравлических условий всего бассейна. На реках, подверженных частому образованию заторов или оползней, уровни воды должны быть рассчитаны с учетом высшего уровня подпора, вызванного заторами ниже по течению. Строительство высоких дамб, как правило, непривлекательно с точки зрения затрат, а также из-за угрозы потенциального ущерба, к которому может привести перелив воды через гребень дамбы. Расчетные уровни воды в замерзающих реках должны быть определены на основе наблюдений за участками реки, свободными ото льда, при условии, что режим потока ничем не нарушен.

Высота надводной стенки дамбы над проектным уровнем паводка должна гарантировать невозможность перелива воды через гребень дамбы; должны приниматься во внимание неопределенности оценки расчетных паводков, в т. ч. связанные с возможным изменением климата, а также невозможность возникновения значительного потока через тело дамбы в результате фильтрации и переливания волн через ее гребень. В зависимости от условий волнения и уклона внутренней стенки дамбы высота надводной части дамбы обычно в диапазоне от одного до двух метров. Для сокращения расходов на строительство надводные борта могут быть сооружены в виде стенок на гребне дамбы. Устойчивость насыпных дамб, и не только с точки зрения веса, а также в связи с подверженностью фильтрации, зависит от продолжительности паводков. Таким образом, статистический анализ продолжительности стояния определенных уровней воды может помочь при проектировании и строительстве дамб, устойчивых к фильтрации. Дренажные шлюзы, подъездные дороги на гребень или к подножью, затворы и дрены подошвы — все это важные компоненты, которые следует рассматривать при проектировании дамбы.

Положение дамб и ширина незащищенных пойм регулируется влиянием гидравлических условий пропускной способности русла выше и ниже по течению. При планировании месторасположения дамб следует рассматривать влияние расстояния между насыпями

на изменение в связи с уменьшением размера долины уровня воды выше по течению, снижение которого требуется теперь. Слишком незначительное расстояние между насыпями может привести к неприемлемому росту уровня воды выше по течению и к чрезмерному отложению песка в верхнем или нижнем течении реки. Потеря вместимости долины может быть сведена к минимуму, если пойма берега находится на более низком уровне или может быть оставлена незащищенной, в зависимости от ситуации. Такое решение возможно только тогда, когда пойма одного берега имеет более низкое экономически выгодное значение, чем пойма другого берега.

Угроза прорыва насыпных дамб не может быть устранена полностью. Следовательно, в длинных дамбах должны быть предусмотрены затворы для обеспечения безопасности охраняемых районов с высоким экономически выгодным значением за счет затопления территорий с менее важным экономическим значением, таких как сельскохозяйственные угодья. Размер территории, которая будет затоплена при прорыве дамбы, может быть оценен на основе предшествующего опыта, а при необходимости — с помощью гидравлических данных. Должны быть разработаны планы действий на случай чрезвычайных ситуаций и необходимо оповещать население заблаговременно до опасных событий и во время их о возможном затоплении. Аварийное планирование потенциальных прорывов насыпей составляет жизненно важный компонент комплексного подхода регулирования паводков.

4.3.5 **Мероприятия, не связанные со строительством сооружений**

4.3.5.1 **Общие положения**

Применение исключительно мер, связанных со строительством сооружений, не может полностью исключить факторы риска паводков. Наоборот, реализация этих мер может сформировать ложное чувство безопасности, ведущее к ненадлежащему землепользованию как непосредственно в защищенных областях, так и смежных с ними. Для уменьшения опасности паводков необходимо также рассмотреть уязвимость отдельных видов экономической деятельности к негативным воздействиям затопления.

Мероприятия, не связанные со строительством сооружений, во многом снижают уязвимость по отношению к паводкам. Они могут представлять собой меры планирования и реагирования. Картирование пойм, планирование и регулирование землепользования, прогнозирование паводков, защита от паводков и страхование — все эти меры планирования и подготовки к паводкам должны быть реализованы

до начала наступления паводка. Мерами реагирования являются действия, которые необходимо предпринять во время и после затопления; они включают борьбу с паводками, эвакуацию и экономическую помощь в восстановлении.

4.3.5.2 Планирование землепользования и управление водосбором

Планирование землепользования направлено на снижение факторов риска паводков путем учета их величины, подверженности и уязвимости людей и их экономической деятельности. Управление водосбором состоит в принятии мер, которые оказывают влияние на гидрологический процесс и направлены на изменение направления движения или скорости превращения осадков в сток, особенно в паводковый сток. Меры управления водосбором включают в себя интродукцию растительности и сельскохозяйственных культур, которые защищают почву; запрещение культивации и выпаса скота на склонах, имеющих значительный уклон; восстановление лесных угодий; усовершенствованные методы лесоустройства и контролирование севооборота в сочетании с небольшими инженерно-техническими сооружениями, такими как запруды, траншеи и контурная обваловка.

Меры управления водосбором могут значительно влиять на малые паводки и малые водосборы, но они в значительной мере менее эффективны на больших бассейнах. Важным вкладом в управление бассейном реки является уменьшение заиления рек с намывным руслом. Урбанизация, вызванная изменением землепользования, существенно влияет на величину паводков, сокращая время добегающего и увеличивая пики паводка, особенно на водосборных бассейнах площадью до 100 км². Регулирование землепользования путем принятия уставных норм может помочь контролировать урбанизацию, с тем чтобы она не слишком существенно изменяла гидрологические характеристики рассматриваемых водосборов.

4.3.5.3 Регулирование пойм

Пойма является неотъемлемой частью речной системы, которая обеспечивает пропуск паводковых вод. Когда пойма не занята водой, она является частью суши, предоставляющей возможность для различных видов экономической деятельности. Комплексное регулирование паводков должно обеспечивать такие виды землепользования, которые не только используют суммарные выгоды пойменных земель, но и сводят к минимуму ущерб, неизбежно причиняемый им во время паводков.

Чрезмерное хозяйственное освоение пойм является основной причиной увеличения гибели людей и ущерба

от паводков. Таким образом, наилучший подход заключается в оценке факторов риска, связанных с паводками, идентификации их для информирования всех заинтересованных сторон и, при необходимости, ограничения и даже запрет новых разработок на поймах при планировании землепользования и мер по его регулированию. Однако разрешенные виды деятельности должны предусматривать меры защиты от паводков существующих и вновь сооружаемых строений, а иногда — возможность переноса существующих видов деятельности в другие места. Если степень освоенности территории является значительной или пойма имеет большое значение для производства пищевых продуктов или других ключевых видов экономической деятельности, то могут быть рассмотрены альтернативные стратегии, такие как прогнозирование и защита от паводков. Реконструкция и восстановление территории, сильно пострадавшей от паводка, может включать изменение землепользования как единственно экономически оправданную альтернативу, как например, перемещение в менее опасные районы.

Соответственно поймы могут быть картированы, для того чтобы показать степень вероятности затопления в результате паводков разных периодов повторяемости (например, один раз в 10, 25, 50 и 100 лет), посредством гидравлической маршрутизации расчетных паводков различных частот повторяемости через поймы и определения соответствующих уровней паводков, расходов и затопляемых областей. Результаты могут быть представлены на топографических картах масштаба 1:20 000 или 1:10 000 или даже больше с высотой сечения изогипс, зависящей от топографии.

Уникальные возможности спутников с коротким временем оборота, позволяющие обеспечить полный охват больших площадей через регулярные интервалы времени, представляются ценными для мониторинга и картирования прошедших паводков и, следовательно, для предоставления информации о динамике паводков на крупных реках. Использование спутниковых данных позволяет подробно картировать районы затопления размером до нескольких тысяч квадратных километров. Разновременные спутниковые данные используются в цифровых моделях рельефа для выявления областей затопления, включая затопление под растительным пологом, а также в сочетании с географическими информационными системами и моделированием местности для выявления участков затопления пойм с одновременным определением качества воды.

Наряду с развитием картирования и зонирования пойм необходимо разрабатывать надлежащие правовые и административные протоколы, в т. ч. уставы

пойм и зонирования на основе подзаконных нормативных актов, правил районирования, строительных норм и правил и политики развития территорий (WMO, 2006b).

4.3.5.4 Прогнозирование и предупреждение паводков

Прогнозирование паводков позволяет обществу установить будущие состояния этого гидрологического явления особенно в плане того, когда река может затопить пойму, в какой степени и как долго. Прогнозы паводков, составленные и выпущенные с достаточной заблаговременностью, позволяют органам власти значительно раньше реагировать, например управлять плотинами; открывать или закрывать шлюзы; производить упреждающие сбросы воды для увеличения ёмкости; выпускать упреждающие директивы, такие, как например, запрет на судоходство и рыболовство; применять чрезвычайные меры, такие как обобщенные оповещения, организация эвакуации и оказание помощи населению в зонах высокого риска или выполнение ремонта дамб в местах потенциального прорыва. Для этих целей необходимо разработать эффективную систему предупреждений о паводках (см. главу 7), через которую можно было бы заблаговременно передать сообщение об ожидаемом размере и продолжительности паводка.

Прогнозирование паводков включает систему непрерывного мониторинга и управления независимо от частоты использования. С тем чтобы быть экономически эффективной, такая система должна, по возможности, основываться на подходе, охватывающем многие опасные явления, совмещая системы предупреждений о паводках с другими видами деятельности, такими как обычные ежедневные прогнозы погоды, регулярные гидрометрические измерения и регулирование движения водного транспорта.

Огромное значение имеет доведение разработанного прогноза до пользователей или заинтересованной аудитории: в виде предупреждения, переданного по телефону, факсу, радио, беспроводной связи, информационного сообщения по телевидению и телеграфу, по электронной почте и другим медиа-средствам (см. главу 7), функционирование которых должно быть обеспечено надежной содержащейся в хорошем техническом состоянии системой связи.

4.3.5.5 Страхование от паводков и другие экономические инструменты

Основной целью страхования от паводков является распределение вызванного ими экономического

ущерба таким образом, чтобы общество могло легче справиться с ним. Страхование, если оно не связано с увеличением страховых взносов на подверженность риску, может и не привести к снижению общих потерь для общества. Страхование от паводков отличается от других инструментов возмещения ущерба от паводков тем, что в то время как другие инструменты направлены на снижение стоимости ущерба каждого такого события, страхование распределяет потери во времени и пространстве. Это возлагает часть нагрузки на тех, кто получает доход от использования пойм, а не только на правительство.

Исследования восприятия риска, проведенные в США, показывают, что при отсутствии обязательного страхования люди склонны воспринимать риск затопления как низкий и поэтому не приобретают страховку. Важно, чтобы политика государства была последовательной, так как некоторые люди могут не купить страховку, если предыдущий опыт показал, что правительство предоставляет помощь всем, независимо от страхового покрытия. Кроме того, только добровольное страхование может не дать достаточно средств для покрытия будущих требований по компенсациям. Однако как показала практика, сделать страхование обязательным и, следовательно, эффективным нелегко, если ему не предшествует основательная образовательная кампания. Страховые тарифы могут зависеть от риска, от потенциальной возможности жителей уменьшить риск потерь, например, защищая свою собственность от паводков. Страхование является вариантом, который должен быть рассмотрен, но на данный момент оно, вероятно, не является реальной альтернативой во многих развивающихся странах.

Страхование от паводков доступно в ряде стран с хорошо развитыми рынками страхования, таких как Германия, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии, Соединенные Штаты Америки и Япония. В этих странах наблюдается значительное разнообразие форм осуществления страхования от паводков, а также методов, используемых для определения страховых премий. Для успешности страхования необходимо обеспечить четкое определение риска, так как страховые выплаты должны отражать степень риска в данном месте поймы, которые определяются на основе повторяемости паводков и гидравлического моделирования. По возможности, страхование от паводков должно рассматриваться как дополнение к программе зонирования пойм. Но единой для всех стран модели оптимальной программы страхования от паводков не существует.

4.3.5.6 Противопаводковая защита

Под противопаводковой защитой понимается следующее:

Сочетание строительных изменений и/или конструктивных элементов, включенных в проект, и/или строительство и переоборудование отдельных зданий, сооружений или объектов собственности, в первую очередь, подверженных воздействию паводков, для сокращения или предотвращения ущерба от паводков (USACE, 1995).

Примером конкретных действий, направленных на снижение ущерба от паводков, является установка барьеров перед всеми отверстиями на уровне земли, чтобы предотвратить просачивание воды и попадание мусора в основное строение. Такие устройства могут быть постоянными или временными, причем последние устанавливаются до наступления прогнозируемого паводка (Szöllösi-Nagy and Zevenbergen, 2005). Противопаводковая защита также может быть обеспечена за счет размещения строений выше уровня расчетного паводка. Таким образом можно разместить жилые строения, убежища для животных и общественные здания, в т. ч. временные убежища на случай чрезвычайной ситуации.

4.3.6 **Управление при чрезвычайных обстоятельствах, вызванных паводками**

Вне зависимости от того, какие стратегии будут приняты для уменьшения опасности паводков, всегда будут существовать некоторые остаточные риски. Ни одна из стратегий, независимо от того, какие меры она применяет: строительные меры и сооружение насыпей или меры, не связанные со строительством сооружений, такие как восстановление лесов, не может обеспечить полную безопасность населению пойменных территорий. Если защита не оказалась успешной, то ущерб может быть значительно больше там, где осуществлялись инвестиции в освоение поймы. Для многих обществ во всем мире затраты на сокращение риска вследствие применения дорогостоящих мер строительного характера или политики, направленной на перемещение землепользований, находящихся в зоне риска, просто недоступны. Возможно также, что такие меры могут привести к ухудшению окружающей среды или будут противоречить каким-либо специфическим целям развития. Альтернативной стратегией, требующей рассмотрения, даже если были применены строительные меры, является снижение уязвимости территорий путем повышения их готовности к стихийным бедствиям и чрезвычайным паводкам. Если паводок неизбежен, то важно принять меры, снижающие его негативное воздействие на проживание людей. Регулирование паводков в чрезвычайных ситуациях направлено на контролирование и сведение к минимуму его разрушительных последствий. Цель состоит в том, чтобы предотвратить потерю человеческих жизней и избежать нанесения ущерба важным видам

деятельности, временно перемещая людей и такую деятельность из районов, подверженных затоплению, таким образом, снижая его негативное влияние на общину. Регулирование паводков в чрезвычайных ситуациях можно разделить на три этапа:

- a) готовность: допаводочные меры для обеспечения эффективной реакции;
- b) реагирование: меры, принимаемые во время паводка по сокращению его негативных последствий;
- c) восстановление: меры по оказанию помощи пострадавшей общине в восстановлении и строительстве после прохождения паводка.

Управление при чрезвычайных обстоятельствах, вызванных паводком, требует сотрудничества между различными секторами и административными уровнями. Помимо мобилизации ресурсов жизненно важно поддерживать постоянный, своевременный и точный обмен информацией в поддержку усилий тех людей, которые занимаются проблемами, вызванными чрезвычайной ситуацией. Планирование мер реагирования на чрезвычайную ситуацию должно быть завершено задолго до сезона паводков и основываться на четких технических и финансовых планах, разработанных в соответствии со сценариями паводков, которые могут возникнуть. Планы управления в условиях чрезвычайных ситуаций должны быть предметом регулярного обзора и пересмотра. Практический опыт, извлекаемый каждый год в сезон паводков, необходимо инкорпорировать в планы на будущее. Важными элементами этих планов являются:

- a) оценка опасности паводков и факторов, определяющих потери от паводков;
- b) зонирование защищенных или незащищенных районов в соответствии с факторами риска паводков;
- c) инвентаризация систем защиты и борьбы с паводками;
- d) анализ технических средств противодействия паводкам на случай разрушения защитных сооружений;
- e) изучение ситуаций, способных возникнуть, если некоторые элементы системы защиты от паводков не сработают;
- f) планирование второй, третьей и последующих линий защиты в случае поочередной неудачи линейных систем защиты, таких как дамбы;
- g) смета расходов противопаводковых мероприятий в различных ситуациях;
- h) разработка путей и планов эвакуации, планирование размещения объектов временного жилья, продовольственного обеспечения, медицинских учреждений и т. д.

Ключевыми компонентами плана действий при чрезвычайных ситуациях, созданных паводками, являются: система заблаговременных предупреждений, защита критически важных объектов и отдельных сооружений инфраструктуры, оценка неотложных

проблем и обеспечение населения безопасными убежищами, удовлетворяющими потребности людей всех возрастов обоих полов.

4.3.6.1 **Готовность к чрезвычайным ситуациям и реагирование на них**

Наиболее важным моментом в области сокращения ущерба от паводков является деятельность по обеспечению готовности к чрезвычайным ситуациям и реагированию на них. Как уже было указано в предыдущем разделе, подробные планы реагирования должны быть подготовлены заранее и рассмотрены координационной группой совместно со всеми ключевыми учреждениями и участвующими сторонами, с четким распределением обязанностей между ними таким образом, чтобы при чрезвычайной ситуации не возникало никакого беспорядка. План должен содержать механизм координации действий, включающий снабжение комитетов реагирования, места для проведения совещаний и источники информации. Часто это принимает вид центра управления чрезвычайными ситуациями, где доступны материалы, вспомогательный персонал и информация, такая как карты и планы. Осведомленность пострадавших общин должна повышаться и поддерживаться с полным пониманием того, как реагировать надлежащим образом. Это будет иметь решающее значение в достижении быстрого реагирования, например при организованной эвакуации из пострадавшего от стихийного бедствия района. Информация о путях эвакуации и убежищах должна быть доступна всем заблаговременно. Аварийно-спасательные команды должны проходить подготовку заранее, а их навыки должны постоянно обновляться в ходе регулярно проводимых, организованных на местах учений по действиям в чрезвычайных условиях.

Ключевым компонентом любого плана подготовки к чрезвычайным ситуациям является инвентаризация доступных ресурсов. В случае наводнения к ним можно отнести автомобили, автобусы, грузовики, землеройную технику, насосы, покрывные и защитные материалы, генераторы, строительные материалы и средства мобильной связи. Основная ответственность за разработку и осуществление таких работ в целом лежит на администрации пострадавшего района, которая также, в случае необходимости, принимает решение о сроках и способах эвакуации населения, нуждающегося в ней.

Меры, принимаемые во время паводков для предотвращения ущерба, а также для отвода паводковых вод от районов возможного подтопления, известны как противопаводочные. Это чрезвычайные меры, направленные на смягчение воздействия паводка на общество и окружающую среду. Борьба с паводками включает в себя строительство временных дамб из любого

доступного материала; закрытие брешей мешками с песком; перемещение товаров и оборудования в места, недоступные паводку; защиту недвижимого оборудования с помощью пластиковых панелей или покрытия жиром и т. д. В период паводков часто нарушается работа водоснабжения и канализации, что грозит потенциально серьезными последствиями для здоровья населения. Поэтому борьба с паводками включает в себя элементы обслуживания инфраструктуры, связанной со здравоохранением.

4.3.6.2 **Восстановление после паводка**

После отступления паводка пострадавшим потребуется помощь для как можно более быстрого и полного восстановления условий, имевшихся до наступления паводка. В число необходимых мер входит восстановление автомобильных и железных дорог, энергетических установок, общественных зданий, водоснабжения и канализации, складских и торговых центров, промышленных предприятий, заводов, птицеферм, рыболовства, свиноферм, колодцев и сельскохозяйственной техники, ирригационных и дренажных систем и сооружений. Необходимо принять меры для откачки воды из низменных районов и удалить отложившийся на подвергшихся затоплению территориях слой песка и ила. В целом меры должны обеспечить экономическое стимулирование пострадавших от паводка районов.

Соответствующий административный комитет окажет жертвам наводнения финансовую и другую помощь для облегчения их бедственного положения. На международном уровне Бюро координатора ООН по оказанию помощи в случае стихийных бедствий располагает средствами для оказания помощи жертвам разрушительных наводнений и других стихийных бедствий. В некоторых странах для этой цели созданы постоянные резервные запасы, и помощь может принимать форму грантов, беспроцентных или льготных кредитов и субсидий. Помощь может предоставляться в таких формах как предоставление на бесплатной основе семян и других сельскохозяйственных ресурсов фермерам. Во многих случаях жертвам паводков на национальном уровне предоставляется помощь на основе специальных программ правительства и общественных организаций, таких как местные отделения Красного Креста и Красного Полумесяца, а также на международном уровне со стороны Международной федерации обществ Красного Креста и Красного Полумесяца и Бюро координатора ООН по оказанию помощи в случае стихийных бедствий. Некоторые правительства объявляют временное освобождение от налогов для пострадавших, уменьшая таким образом нагрузку на них.

После крупномасштабного паводка очень важно оценить в срочном порядке причины и последствия

стихийного бедствия, а также эффективность действий при чрезвычайной ситуации, после чего должны последовать рекомендации, которые повысят степень готовности к последующему паводковому событию и сократят убытки от него. Несомненно одно: в будущем когда-нибудь обязательно будет еще один паводок.

4.4 ОРОШЕНИЕ И ОСУШЕНИЕ [ГОМС К70]

4.4.1 Орошение

Практика орошения как средства производства продуктов питания используется уже в течение более 5 000 лет (Framji, 1987). Во второй половине двадцатого века площадь орошаемых земель в мире увеличилась примерно со 115 млн га до более 270 млн га. Это привело к более чем к двойному приросту общего объема производства продовольственного зерна в мире (зерновые, масличные и бобовые) с 1 763 млн тонн до 3 891 млн тонн. Орошаемые земли составляют 20 процентов от общей площади сельскохозяйственных культур в мире и дают более 40 процентов от общего объема производства продуктов питания. Орошение в сочетании с использованием высокоурожайных сортов сельскохозяйственных культур, которые можно выращивать только в условиях орошения, действительно является важным элементом во многих странах, прилагающих все усилия, чтобы добиться и поддерживать самообеспеченность продовольственным зерном.

Орошение является крупнейшим потребителем воды, используя более 70 процентов запасов пресной воды в мире. Хотя орошение не является новой отраслью, большинство систем орошения управляются неэффективно с КПД, редко превышающим 40 процентов. История изобилует примерами цивилизаций, которые обязаны своими успехами хорошо спланированным и управляемым системам орошения, и тех цивилизаций, которые прекратили своё существование из-за ошибочного и неэффективного управления оросительными системами. В центре эффективного управления оросительными системами лежит поддержание соответствующего режима влажности почвы в корневой зоне растений для содействия здоровому росту растений. Это требует своевременной поставки соответствующего количества воды и удаления избыточной воды из корневой зоны. Поэтому для надлежащего рационального использования водных ресурсов в сельском хозяйстве нужно как орошение, так и осушение.

4.4.1.1 Причины, по которым растения нуждаются в орошении

Вода необходима растениям по многим причинам:

a) почти на 70 процентов растение состоит из воды;

- b) первоначально вода требуется для того, чтобы смягчить семена и их оболочку для облегчения, во-первых, появления корня, а во-вторых — прорастания ростка сквозь слой почвы;
- c) вода является растворителем и растворяет и передает через корни растений питательные вещества, такие как азот, фосфор и калий, необходимые для здорового роста растений;
- d) вода является растворителем при осуществлении биохимических реакций в растениях, таких как фиксация углерода и фотосинтез;
- e) углерод, азот, водород и кислород, необходимые для роста растений, добываются из воды и атмосферного воздуха и составляют большую часть растения;
- f) примерно 95 процентов воды, поглощенной растениями, испаряется с листьев и стеблей. Этот процесс также способствует охлаждению растений в жаркую погоду;
- g) без воды растения увядают и, в конечном счете, погибают.

Почва способна удерживать влагу за счет адсорбции и поверхностного натяжения. Любая дополнительная влага, которая поступает в почвенный слой, уже не удерживаемая этими силами, движется вниз через поры почвы под действием силы гравитации. Этот процесс известен как просачивание. Та сила сцепления, которая задерживает воду в почве и характеризует силу, необходимую для извлечения воды из почвы, называется поверхностным натяжением почвенной влаги. Количество влаги в почве называется влагосодержанием почвы. Влагосодержание почвы, при котором растения уже не могут извлекать воду из почвы для удовлетворения их потребностей в суммарном испарении, известно как точка увядания. Когда влажность почвы падает до этого уровня и если не возобновляется поступление вода в корневую зону, то растения увядают и погибают. Доступное количество почвенной влаги, значение которого находится между значениями влагосодержания при нормальной влагоёмкости и в точке увядания, называется полезной влагоёмкостью.

Целью орошения сельскохозяйственных культур является обеспечение корневой зоны достаточным количеством воды в любое время в диапазоне между нормальной влагоёмкостью и влажностью точки увядания. Влажность почвы зависит от осадков, ирригации, суммарного испарения, стока, инфильтрации и глубинного просачивания. Когда все пустоты в почве полностью заполнены водой, почва находится на пределе своей способности насыщаться. При этом вода будет стекать из корневой зоны под действием силы тяжести, пока не будет достигнуто равновесие. В этом случае почва находится в состоянии полевой влагоёмкости. Этот уровень, как правило, достигается

в течение одного-трех дней после полива или дождя. Эффективное орошение возвращает корневую зону на уровень полевой влагоёмкости. Увеличение поступления воды сверх этого количества считается потерей, если это не делается намеренно для выщелачивания.

4.4.1.2 Потребности в воде сельскохозяйственных культур

Потребности в воде сельскохозяйственных культур выражаются слоем воды, необходимой для возмещения потерь воды на суммарное испарение с поверхности здоровых сельскохозяйственных культур, выращиваемых на больших полях при отсутствии ограничений в отношении почвенных условий, включая отсутствие дефицита почвенной влаги и ограничения по плодородию почв (Doorenbos and Pruit, 1977).

Потребности в воде зависят от сельскохозяйственной культуры и места произрастания, т. е. от вида культуры, местного климата и почвы. Они рассчитываются за определенный период времени, например, неделю, месяц или вегетативный сезон.

Суммарное испарение включает в себя испарение с прилегающей поверхности почвы, испарение перехваченной воды и транспирацию через поры поверхности эпидермиса растения, например коры или листьев. Кроме того, вода необходима для метаболической деятельности, обеспечивающей рост растений. Общее количество воды, необходимое для здорового роста культур, называют суммарным водопотреблением. Однако количество воды, необходимое для метаболической деятельности, очень мало по сравнению с потребностями на суммарное испарение (менее одного процента) и, таким образом, термины суммарное водопотребление и суммарное испарение сельскохозяйственных культур являются взаимозаменяемыми.

Обычно потребности сельскохозяйственной культуры в воде частично удовлетворяются за счет локальных осадков и запаса почвенной влаги, а также в результате капиллярного поднятия грунтовых вод там, где уровень грунтовых вод ближе к корневой зоне. Только часть осадков, называемая эффективными осадками, используется сельскохозяйственными культурами для роста. Следует соблюдать осторожность при использовании этого термина, поскольку под эффективными осадками специалисты из различных дисциплин подразумевают разные характеристики. Для инженера водного хозяйства эффективные осадки — это осадки, которые достигают водохранилища в виде стока, а для гидрогеолога — это часть осадков, которая пополняет грунтовые воды. Для агронома или фермера — это часть осадков, способствующая удовлетворению потребностей растущих в воде сельскохозяйственных культур, обусловленная суммарным испарением.

С точки зрения потребностей сельскохозяйственных культур в воде, эффективные осадки — это та часть осадков, которая прямо или косвенно полезна для роста сельскохозяйственных культур на участке, где они выпадают, но без применения каких-либо механических средств. Остальные осадки либо испаряются обратно в атмосферу, либо стекают по поверхности почвы, либо поглощаются почвой или просачиваются через корневую зону. Количество эффективных осадков зависит от различных факторов, таких как вид растений, условия влажности почвы в корневой зоне, климат и временное распределение осадков. Подробная информация об оценке эффективных осадков для конкретных ситуаций сельскохозяйственных культур, почв и климата дана в публикации *Irrigation and Drainage Paper 25* (Ирригация и дренаж, № 25) Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО) (Dastane, 1972).

4.4.1.3 Определение потребностей сельскохозяйственных культур в воде

В течение многих лет ФАО выпускает различные рекомендации по оценке потребностей сельскохозяйственных культур в воде. В частности, публикация *Irrigation and Drainage Paper 56* (Ирригация и дренаж, № 56) (Allen and others, 1998) содержит подробные расчеты потребностей культур в воде.

В 1990 г. группа экспертов рекомендовала ФАО принятие комбинированного уравнения Пенмана-Монтейта в качестве нового стандарта для оценки суммарного испарения. Этот метод использует стандартные климатические данные, которые можно легко измерить или получить по другим широко используемым данным, и обеспечивает согласованные значения для расчета потребности сельскохозяйственных культур в воде по всему миру. Основные понятия и идеи, связанные с определением потребности растений в воде, кратко приведены ниже.

4.4.1.3.1 Испарение и транспирация

Испарение является процессом преобразования жидкой воды в водяной пар и ее удаления с испаряющей поверхности. Испарение происходит с поверхности озер, рек, увлажненных территорий, почв и растительности. Транспирация — это процесс испарения жидкой воды, содержащейся в тканях растений, и её перемещения в атмосферу. Испарение с сельскохозяйственных культур происходит преимущественно через поры. Почти вся вода, поглощаемая растениями из почвы, теряется вследствие транспирации, и лишь малая ее часть используется для метаболического роста.

4.4.1.3.2 Суммарное испарение

Испарение и транспирация происходят с посевных площадей одновременно и их очень трудно разделить. Таким образом, они вместе представлены термином суммарное испарение (E_T). Как правило, суммарное испарение выражается в мм в сутки. Испарение с засеянного участка в основном зависит от интенсивности солнечного излучения, достигающего поверхности почвы, и изменяется в зависимости от стадии роста сельскохозяйственных культур. На этапе посева почти 100 процентов суммарного испарения с участка составляет собственно испарение с него, а при полном покрытии сельскохозяйственной культурой более 90 процентов суммарного испарения составляет транспирация. При оценке суммарного испарения с сельскохозяйственных культур следует учитывать тип культур, разновидность и стадию роста. Изменения высоты культур, их шероховатости, корневых характеристик, альбедо, устойчивости к транспирации, поверхности грунта приводят к различным значениям суммарного испарения с сельскохозяйственных культур при прочих одинаковых условиях окружающей среды.

Для характеристики суммарного испарения используются три термина: контрольное суммарное испарение (E_{T_0}), суммарное испарение при стандартных условиях (E_{T_c}) и суммарное испарение в нестандартных условиях (E_{T_n}). Дополнительную информацию по испарению и суммарному испарению см. в главе 4 тома I настоящего Руководства.

4.4.1.3.3 Контрольное суммарное испарение

Скорость суммарного испарения с контрольной поверхности, не испытывающей недостатка влаги, называется контрольным суммарным испарением E_{T_0} . Принятие понятия контрольного суммарного испарения облегчает изучение дефицита влажности атмосферы независимо от почвенных факторов, типов культур, роста, развития и способов обработки. Таким образом, факторами, влияющими на контрольное суммарное испарение, являются климатические параметры, поэтому оно может быть вычислено по наблюдаемым или рассчитанным данным о погоде. Метод Пенмана-Монтейта рекомендуется FAO в качестве единственного метода определения контрольного суммарного испарения. Выбор этого метода обусловлен тем, что он дает точную оценку суммарного испарения с покрытой растительностью территории, разработан на четкой физической основе и учитывает в полном объеме как физиологические, так и аэродинамические параметры. Этот метод требует данных о солнечной радиации, температуре воздуха, влажности воздуха и скорости ветра. Он так же включает процедуры расчета климатических параметров по метеорологическим

данным. Кроме того, существуют процедуры оценки недостающих метеорологических параметров, необходимых для расчета контрольного суммарного испарения. Это позволяет оценить значение этого параметра в различных случаях, даже при отсутствии климатических данных. Отнесение суммарного испарения к определенной поверхности даёт точку отсчёта, относительно которой возможно рассматривать суммарное испарение с других поверхностей. Это устраняет необходимость определения суммарного испарения отдельно для каждой культуры и стадии роста. Наличие такого опорного отсчёта облегчает сравнение значений контрольного суммарного испарения в различных местах или в разные сезоны. Отсчётная поверхность — это гипотетическая культура со специфическими характеристиками. Контрольная культура определяется как:

...гипотетическая культура с предполагаемой высотой 0,12 м, с поверхностным сопротивлением $70 \text{ с}\cdot\text{м}^{-1}$ и альбедо 0,23, величина испарения с которой близка к испарению с обширной поверхности, покрытой зеленой травой одинаковой высоты, активно растущей и удовлетворительно поливаемой... (Allen and others, 1998).

Подробные расчеты суммарного испарения с контрольных культур приведены в главе 4 части А публикации *Irrigation and Drainage Paper 56* (Ирригация и дренаж, № 56) FAO (Allen and others, 1998). Использование других понятий, таких как потенциальное суммарное испарение (ПСИ), не рекомендуется из-за определенных неясностей, связанных с такими терминами.

4.4.1.3.4 Суммарное испарение с сельскохозяйственных культур при стандартных условиях

Под этим понимается испарение с сельскохозяйственных культур, которые выращиваются на больших, удовлетворительно орошаемых полях при качественном уходе в хороших экологических условиях и дают максимально возможный урожай в данных климатических условиях (Allen and others, 1998).

4.4.1.3.5 Суммарное испарение в нестандартных условиях

Фактическое суммарное испарение с культур зависит от таких факторов, как засоленность почв, наличие заглобленного уплотненного почвенного слоя, низкая плодородность почв и плохое управление ими, недостаточные меры по защите растений, растительный покров, его плотность и влагосодержание почвы. Поэтому величина суммарного испарения в стандартных условиях, как правило, требует корректировки в соответствии с вышеописанными нестандартными условиями.

Прогнозирование сокращения суммарного испарения, вызванного засоленностью почвенных вод, может быть выполнено путем совмещения уравнений для расчета засоленности почвы, приведенных в публикациях *Irrigation and Drainage Paper 29* (Ирригация и дренаж, № 29) ФАО (Ayres and Westcot, 1985), с уравнениями отдачи-суммарного испарения из *Irrigation and Drainage Paper 33* (Ирригация и дренаж, № 33) (Doorenbos and Kassam, 1979). Эти данные приведены в публикации *Irrigation and Drainage Paper 56* (Ирригация и дренаж, № 56) ФАО (Allen and others, 1998).

Суммарное испарение с сельскохозяйственных культур ET_c для любой отдельной культуры определяется путем умножения контрольного суммарного испарения ET_0 на коэффициент K_c , называемый коэффициентом культуры (ET_c/ET_0). Значение коэффициента культуры зависит от ее типа, стадии роста растений и погодных условий. Этот коэффициент также учитывает различия в растительном покрове и аэродинамическом сопротивлении рассматриваемых культур по сравнению с контрольной культурой. Таким образом, коэффициент служит характеристикой совокупности физических и физиологических различий между культурами.

4.4.1.4 Потребность в орошении

Согласно определению орошение — это искусственная подача воды к растениям для обеспечения здорового роста сельскохозяйственной культуры. Оно отличается от естественного поступления воды из осадков, почвы и капиллярного подъема из грунтовых вод. Полная потребность в орошении — это количество воды, которое должно быть доставлено посредством орошения в корневую зону растений с учетом вклада осадков, влажности почвы и капиллярного питания от грунтовых вод. Она должна включать любые особые потребности в воде, например для выщелачивания солей из корневой зоны, а в случае рисовых и джутовых полей воду, необходимую для подготовки земли, потребность в стоячей воде, на просачивание и периодический водоотвод.

Соответственно, полная потребность в орошении сельскохозяйственной культуры равна потребностям на суммарное испарение ET_c в её корневой зоне (потребность культуры в воде), а также особым потребностям в воде сельскохозяйственных культур, как, например, вода, необходимая для выщелачивания и подготовки земли, за вычетом эффективных осадков, почвенной влаги и капиллярного питания от грунтовых вод.

При орошении неизбежны некоторые потери воды в процессе ее транспортирования от источника до корневой зоны, а также при распределении и использовании.

Эффективность орошения зависит от эффективности транспортировочной системы, системы распределения, метода и сроков орошения. Следовательно, общее количество требующейся для полива воды, известное как валовая потребность орошения, оценивается следующим образом:

$$\text{Валовая потребность орошения} = \frac{\text{Полная потребность орошения}}{\text{Эффективность орошения}},$$

где эффективность орошения — это эффективность применения, умноженная на эффективность распределения и на эффективность транспортирования.

Полная и валовая оросительные потребности могут быть оценены на уровне отдельных полей или ферм, а также на уровне рассматриваемой площади с незначительным или крупным рукавом, либо главным рукавом, либо магистральным каналом или для проекта орошения с использованием соответствующего значения эффективности. Валовая оросительная потребность выражается в единицах объема воды на один гектар посевных площадей в течение определенного периода времени, например недели, месяца или вегетационного сезона.

4.4.1.5 Системы орошения

Источниками воды для орошения могут служить искусственные водохранилища и озера, подземные воды, получаемые посредством открытых колодцев или скважин или из естественных водотоков через водоводы. В случае если вода содержится в резервуарах, образованных дамбами и плотинами, орошаемые площади могут находиться далеко от источника воды и, возможно, воду на сельскохозяйственные поля придется подавать через обширную распределительную сеть каналов, крупных и мелких рукавов (см. рисунок II.4.11). Распределительная сеть, как правило, минимальна, если вода для орошения берется из рек, озер и подземных горизонтов (в порядке убывания). Значительные потери на фильтрацию наблюдаются при транспортировании воды от источника до мест выпуска воды на поля. Дополнительные потери воды связаны с ее распределением по полям, ниже выпусков, посредством полевых каналов. Поэтому важно, чтобы эффективность орошения, используемая для оценки валовой оросительной нагрузки на источник, учитывала потери транспортировки и распределения воды в системе.

Орошение сельскохозяйственных культур осуществляется различными методами, которые можно разделить на поверхностные и подземные методы. Методы орошения могут также быть разделены на осуществляемые под действием силы тяжести или под давлением (см. рисунок II.4.12). Подробное описание

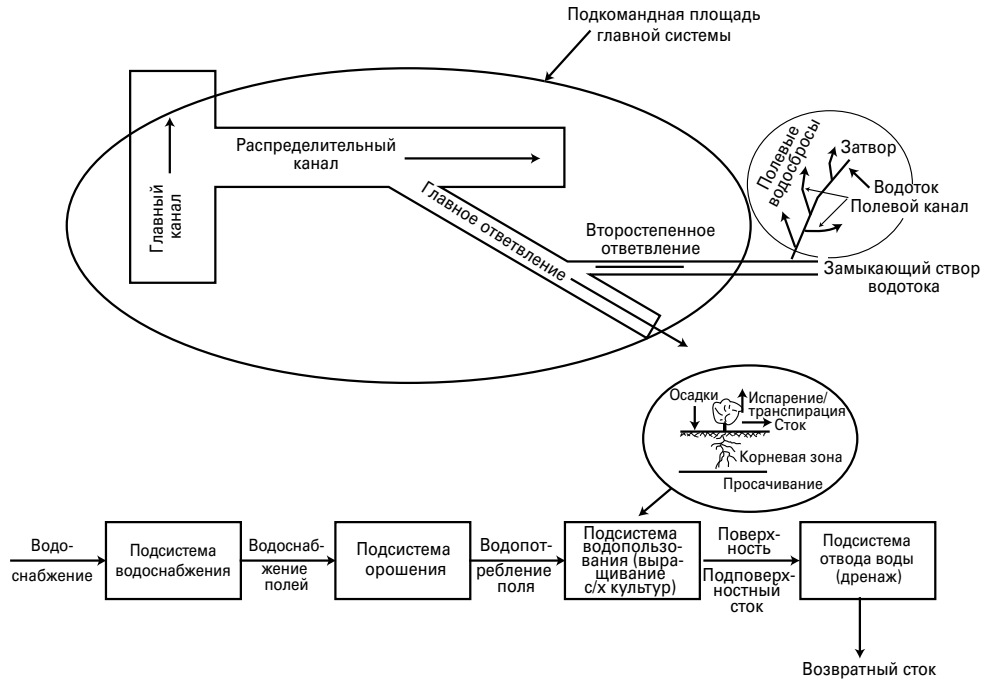


Рисунок II.4.11. Ирригационная система

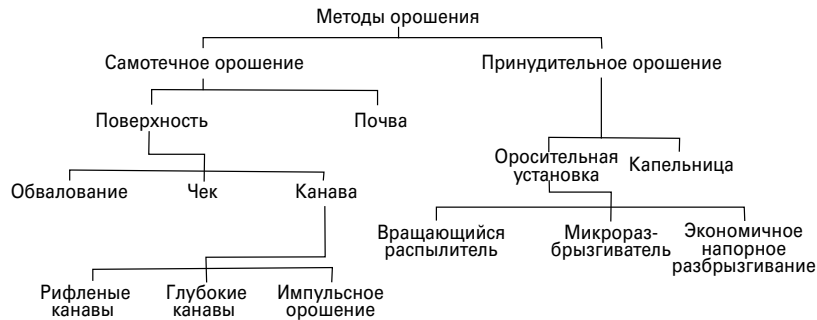


Рисунок II.4.12. Общая классификация методов орошения

и процедуры проектирования таких оросительных систем доступны в общепринятых учебниках по орошению.

4.4.1.6 Влажность почвы

Применение разных методов орошения приводит к различной степени доступности влаги в корневой зоне (см. рисунок II.4.13). Метод орошения, который обеспечивает равномерную влажность корневой зоны, равную или близкую уровню нормальной влагоёмкости, вызывает наименьший стресс у растений, что способствует здоровому росту. Современный контроль орошения и методы его осуществления основаны на

мониторинге состояния влажности почвы в корневой зоне. Влажность почвы на различных глубинах в корневой зоне может быть определена гравиметрическими или объёмными методами. Современные приборы, такие как нейтронные датчики влаги и рефлектометры временной области, все чаще используются для точного мониторинга влажности почвы в корневой зоне (см. том I, раздел 4.5). Данные проб влажности почвы могут быть введены в компьютеры для оценки потребностей в орошении и автоматического управления оросительной системой. Большинство современных автоматизированных систем контроля и управления орошением основаны на таком подходе.

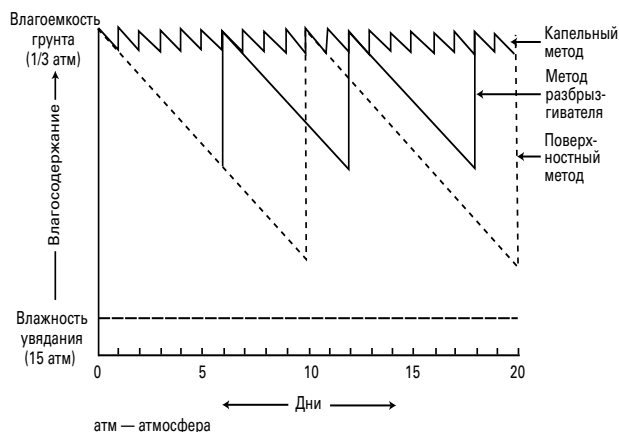


Рисунок II.4.13. Режимы влажности почвы при различных методах орошения

4.4.1.7 Планирование орошения сельскохозяйственных культур

Вода для орошения должна применяться таким образом, чтобы, насколько это возможно, потребность сельскохозяйственных культур в воде удовлетворялась во времени. Поскольку потребность в воде изменяется с течением времени в связи с ростом сельскохозяйственных культур, а также из-за выпадения осадков, их обеспечение поливной водой должно следовать хорошо спланированному графику. Такой график должен обеспечить использование нужного количества воды в нужное время, с тем чтобы получить высокий урожай хорошего качества с высокой эффективностью использования воды, с наименьшим ущербом для окружающей среды и при низкой себестоимости. Создание такого графика называется планированием орошения. Существует несколько распространенных практик планирования орошения. Такие процедуры зависят от того, достаточно или ограничено водоснабжение.

4.4.1.7.1 Планирование орошения при достаточном водоснабжении

В случаях, когда имеется достаточное количество воды, целью планирования орошения является ликвидация периодов дефицита воды в целях получения максимально возможного урожая. Орошение применяется для пополнения почвенной влаги тогда, когда содержание воды в почве корневой зоны падает до уровня, при котором начинается негативное влияние на урожай. Агрономы и ученые стремятся получить наибольший урожай на отдельных полях при заданном водоснабжении путём использования практических знаний о реакции сельскохозяйственных культур на доступные почвенные воды. Основными факторами, определяющими график орошения, в данном случае являются климатические условия, почва, тип

культуры и стадия роста. В литературе представлены результаты многочисленных агрономических исследований, приводятся графики орошения для различных систем земледелия и сельскохозяйственных культур. Исследования, как правило, сосредоточены на определении глубины и периодичности орошения в зависимости от потребностей в воде сельскохозяйственных культур на различных этапах роста; способов извлечения почвенной влаги из корневой зоны; режима оптимальной влажности почвы, который должен поддерживаться в корневой зоне на различных этапах роста, и других факторов.

Эти процедуры, как правило, руководствуются одним из следующих критериев

- критические этапы роста культуры (Prihar and others, 1976);
- соотношение подведённой оросительной воды к суммарной величине испарения (Prihar and others, 1976);
- истощение почвенных вод (Rao and others, 1988a and 1988b; Hajilal and others, 1998);
- оценка суммарного испарения с сельскохозяйственных культур с учетом климатических факторов и характеристик культуры, определенных экспериментально для каждой культуры, на основе метода Пенмана-Монтъета (Doorenbos and Pruitt, 1977; Allen and others, 1998);
- значения натяжённости почвенной влаги, наблюдаемые на данном поле;
- внешние особенности сельскохозяйственных культур: увядание растений, изменение цвета листьев, скручивание листьев и т. д.;
- показатели растений, такие как относительный водный потенциал листа, содержание воды в листьях и сопротивление листьев диффузии воды.

4.4.1.7.2 Планирование орошения в условиях ограниченного водоснабжения

Когда запасы воды ограничены, ее дефицит в отдельные периоды вегетационного сезона неизбежен. Реакция сельскохозяйственных культур на недостаток воды в разные периоды роста неодинакова, и в некоторые критические периоды их роста дефицит воды оказывает наиболее неблагоприятное воздействие на урожайность, чем в другие. В связи с этим в условиях ограниченного водоснабжения планирование орошения становится проблемой распределения дефицита по сезону таким образом, чтобы он имел минимальные последствия для урожайности сельскохозяйственных культур. Это комплексная проблема и любые попытки ее решения требуют обобщения информации о почве, стадиях роста сельскохозяйственных культур и их реакциях на синхронизированное водообеспечение. Такая структура состоит в основном из разработки и реализации следующих трех компонентов:

- a) модель баланса воды в почве для разделения поступающей воды (осадки и орошение) на различные компоненты;
- b) датированная модель полезности воды, связывающая урожайность сельскохозяйственных культур с количеством воды, использованной в различные периоды их роста;
- c) модель оптимального орошения, которая включает в себя (a) и (b).

4.4.1.7.3 **Оптимальные графики орошения**

Планирование орошения связано с процессом составления оптимального графика орошения сельскохозяйственной культуры во время роста при определенных климатических условиях и водообеспеченности. Для этого необходимы исследования и оценка воздействия всех возможных режимов орошения на урожайность и установление оптимального режима использования соответствующей математической программы оптимизации. Зависимости полезности воды от времени, которые показывают отдачу от орошения в течение различных периодов роста, помогают определить влияние как сроков, так и объема орошения на урожайность сельскохозяйственных культур. Периоды времени орошения либо совпадают с физиологическими стадиями роста этих культур, либо принимаются как некоторые удобные периоды времени, например месяц или неделя.

Основная трудность, связанная с применением этих моделей, состоит в том, что принятие решения по орошению на различных стадиях роста сельскохозяйственной культуры не является независимым. Каждое решение по орошению основывается на данных о количестве влаги в почве, состоянии урожая и имеющихся запасах воды на оставшуюся часть вегетационного периода. Информация обо всех этих факторах должна быть собрана до момента принятия решения по орошению. Следовательно, такие решения многоступенчатые, последовательные и зависят от состояния. В основном эти модели воспроизводят различные динамические процессы, результатом которых является урожай, изменяющийся в зависимости от изменения экологических условий, среди которых дефицит воды. Близкие к максимально возможному урожаю значения могут быть получены при правильном выборе режимов орошения даже при относительно высоком дефиците водоснабжения (Rao and Rees, 1992).

Несмотря на достижения в области моделирования планирования орошения, мнение и опыт специалистов будут по-прежнему основополагающими аргументами при принятии решений в сфере управления оросительными системами. Наиболее подходящий режим орошения может быть разработан при совместном

использовании моделей количественного прогнозирования, местного опыта и знаний фермеров и ответственных за осуществление орошения работников. Такое равновесие возможно за счет интеграции моделей и эвристических знаний в рамках экспертной системы.

Многие фермеры выращивают в течение сезона целый ряд сельскохозяйственных культур. В таких ситуациях ограниченный запас воды означает, что ее будет недостаточно для получения максимальной урожайности всех этих культур. Это приводит к конкуренции за воду между культурами как на сезонном, так и на межсезонном уровне. Проблема сезонного и межсезонного распределения воды между сельскохозяйственными культурами может быть решена путем разделения задачи на два уровня — сезонный и межсезонный.

4.4.1.7.4 **Планирование орошения в реальном времени**

Графики орошения могут быть основаны на моделях оптимизации для целей планирования и проектирования. Однако в реальности как погода, так и водоснабжение могут отличаться от принятых при планировании графиков орошения сельскохозяйственных культур. В связи с этим оптимизированные графики, возможно, должны быть изменены, с тем чтобы соответствовать данным о погоде и водоснабжении в режиме реального времени. Поскольку результат каждого решения можно оценить по полученному урожаю только в конце сезона, они должны разрабатываться последовательно. Таким образом, решения должны приниматься каждую неделю с перспективой на весь срок планирования.

4.4.1.7.5 **Использование среднесрочных прогнозов погоды в планировании орошения**

Среднесрочные прогнозы погоды предоставляют информацию о погоде в ближайшие 3–10 дней и могут быть использованы в управлении сельским хозяйством, включая планирование орошения. Данные о ранее наблюдавшихся осадках могут быть использованы для изучения влияния, оказываемого использованием прогнозов осадков с 3–5 дневной заблаговременностью на графики орошения сельскохозяйственных культур. Хотя среднесрочные прогнозы погоды полезны для планирования орошения относительно маломощных почв и в ситуациях, в которых чаще применяется орошение на малые глубины, они не приводят к значительной экономии воды при орошении глубоко укоренившихся культур в почвах с относительно высокой влагоемкостью.

4.4.1.8 **Методы орошения**

4.4.1.8.1 **Традиционные методы орошения**

Эффективность эксплуатации традиционных систем потокового орошения низка; по этой причине существует востребованность современных экономических методов орошения. К эффективным технологиям относятся полив по бороздам, нагонное орошение и системы принудительного орошения (капельное и разбрызгивание).

4.4.1.8.2 **Нагонное орошение**

Нагонное орошение — вполне современный метод поверхностного орошения (Stringham and Keller, 1979; Stringham, 1988). Орошение осуществляется путем нагона воды вниз по бороздам через заданные интервалы времени, пока вода не доходит до конца борозды. За последние несколько лет исследователи, работающие в полевых условиях, изучали новые возможности использования нагонного потока, основывающиеся на его способности распределять воду равномерно, экономить ее, сокращать инфильтрацию и потери на глубокое просачивание, а также контролировать сток и дренаж через поверхностные системы. Этот метод равномерного распределения воды используется для создания мелкого, однородного профиля воды и задержания ее в корневой зоне, исключая глубокое просачивание. Эффективность этого метода составляет 85 процентов, а экономия расхода удобрений достигает 25 процентов.

4.4.1.8.3 **Системы принудительного орошения**

При подаче воды через трубопроводную систему исключаются потери на транспортировку, что приводит к повышению эффективности орошения. Системы принудительного орошения отличаются высокой эффективностью водопотребления, повышением урожайности сельскохозяйственных культур при низких затратах труда и способностью адаптироваться к условиям холмистой местности. Они подходят для районов с недостаточными водными ресурсами, могут снижать воздействие заморозков и позволяют с легкостью применять растворимые в воде удобрения. Эта система хорошо подходит для площадей, орошаемых по каналам, из ёмкостей и грунтовыми водами. Все густорастущие сельскохозяйственные культуры, такие как зерновые, бобовые, масличные, сахарный тростник, хлопок и другие плантационные культуры могут орошаться методом разбрызгивания. Преимуществом этих систем является то, что неровные почвы и участки почвы на маломощном наносе могут орошаться без выравнивания уровня земли.

4.4.1.8.4 **Капельное орошение**

Капельное орошение является сравнительно современным методом полива. Первоначальные капитальные вложения в такие системы высоки, однако они подходят для ситуаций, требующих высокой эффективности использования воды и могут применяться на умеренно холмистом рельефе местности. В течение последних 30 лет были проведены значительные экспериментальные исследования, с тем чтобы оценить экономию воды и повышение урожайности, конструкционные особенности соответствующих элементов систем и материалы, из которых они изготавливаются, распределение влаги и удобрений при капельном орошении. С помощью этого метода можно достигнуть эффективности использования воды 80–90 процентов.

4.4.1.8.5 **Спринклерная система орошения**

Спринклерные системы распределяют воду аналогично дождевым осадкам, поэтому сток и потери воды на глубокое просачивание сведены к минимуму, а применение этого метода дает результат, близкий к получаемому в условиях выпадения осадков.

4.4.1.8.6 **Микроспринклерная система**

Микроспринклеры обеспечивают распыление воды под кронами деревьев вокруг их корневой зоны на высоту около 30 см и работают при низком давлении. Орошение этим методом наименее подвержено воздействию ветра. Точное количество воды может доставляться ежедневно к корневой зоне каждого растения. Вода подается только в область корневой зоны, как при капельном орошении, но распыляется гораздо более широко. Этот метод хорошо подходит для полива деревьев, садов и овощных культур, особенно в сочетании с использованием локальных возобновляемых источников энергии для перекачки воды.

4.4.1.8.7 **Низкоэнергетические прикладные системы точечного применения**

Последние новшества в сфере систем микроспринклеров — это низкоэнергетические системы точечного применения. В таких системах водоотводы оснащены пипетками с устройствами выброса под очень низким давлением, называемыми «носками». Вода сбрасывается непосредственно над поверхностью земли в тупиковые борозды или микробассейны, таким образом предотвращая эрозию почвы и сток. Эти системы не подвержены воздействию ветра и, помимо экономии значительного количества энергии, они обеспечивают равномерное орошение и очень высокую эффективность применения, порядка 98 процентов.

4.4.1.9 **Разработка систем поддержки принятия решений и использование географических информационных систем в оросительных работах**

Полезно связывать модели имитации и системные модели с пространственными данными с помощью географической информационной системы, с тем чтобы развивать экспертные системы поддержки принятия решений в целях комплексного использования и организации оросительных работ в режиме реального времени. Этот подход ориентирован на обеспечение поддержки процесса принятия решений для специалистов, занимающихся планированием орошения и его организацией, что позволит им без труда и более эффективно использовать пространственные данные и прогнозы.

4.4.1.9.1 **Географические информационные системы для пространственного распределения восполнения запаса воды**

Пространственное распределение восполнения запаса воды для изменяющихся условий погоды, почвы, землепользования и водообеспеченности относительно орошаемой площади проекта оросительной системы может обеспечиваться с помощью использования географической информационной системы. Новые типы покрытия могут быть получены путем наложения цифровой карты рассматриваемой площади на другие карты области, например карты осадков, грунтовых вод и посевных площадей. Каждая из полигональных областей этого покрытия будет однородной по отношению ко всем используемым типам покрытия. Как таковые, эти полигоны могут быть использованы в качестве базовых величин для исследования водного баланса и планирования орошения (Chowdary and others, 2003).

4.4.1.9.2 **Развитие системы поддержки принятия решений по управлению оросительными работами в режиме реального времени**

Системы поддержки принятия решений могут быть разработаны для организации оросительных работ в режиме реального времени посредством объединения данных в реальном времени со схемой системы поддержки принятия решений, разработанной для планирования управления оросительными системами. Простая модель баланса почва–вода может быть использована для оценки состояния влажности корневой зоны в почве, а простая модель потока в канале может применяться для учета фильтрационных потерь. Основываясь на этой информации и на данных о количестве воды, доступной в рукаве реки, а так же

на среднесрочных прогнозах погоды, можно получить еженедельные потребности в воде для целей орошения для каждого рукава реки. Затем эта информация может быть связана с географической информационной системой сети каналов на рассматриваемой площади в целях содействия следующим задачам:

- a) выбор рукава из сети каналов;
- b) запуск модели полевого водного баланса в режиме реального времени;
- c) подготовка сводки о текущем состоянии воды;
- d) подготовка заявки на изъятие воды для удовлетворения потребностей орошения в главном рукаве.

4.4.1.10 **Комплексное использование поверхностных и подземных вод в орошении**

Понятие «комплексное использование» относится к интегрированному согласованному управлению ресурсами поверхностных и подземных вод, с тем чтобы наилучшим образом использовать эти источники воды для удовлетворения определенных целей в отдельных районах. В целях повышения эффективности водопользования на рассматриваемых подкомандных площадях оросительного канала оптимальное и эффективное использование поверхностных и подземных вод становится необходимым и должно быть рассмотрено уже на стадии планирования. Например, использование поверхностных вод в сезон дождей и подземных вод в другой период года для орошения одного и того же участка земли является одним из видов комплексного использования. Аналогичным образом, течи из каналов и просачивание поливной воды — это пополнение запасов подземных вод, которые могут быть использованы в какой-либо момент для орошения. Это еще один, хотя и непреднамеренный пример комплексного использования. Комплексное использование может помочь в достижении следующих целей:

- a) увеличение доступности воды для оросительных работ;
- b) повышение устойчивости долгосрочного равновесного режима подземных вод;
- c) улучшение регулирования и содействие поэтапной разработке водных ресурсов с использованием запасов водоносного горизонта;
- d) обеспечение гибкости водообеспечения для удовлетворения спроса на водные ресурсы, сглаживая пики естественного поступления поверхностных вод;
- e) сокращение заболачивания и засоления почв.

4.4.1.10.1 **Руководства по совместному использованию**

Планирование орошения для совместного использования требует рассмотрения количественных и

качественных аспектов подземных и поверхностных водных ресурсов, а также экономических аспектов. Совместное использование их в оперативной практике требует разработки руководящих принципов (CWC, India, 1997), которые могут включать в себя следующие задачи:

- a) нанесение на карту подземных вод и их изменений во времени и пространстве;
- b) количественная оценка имеющихся подземных вод в регионе на основе детальных исследований водного баланса;
- c) оценка дополнительных источников зарядки подземных вод;
- d) оценка минимально желаемых и максимально допустимых пределов дополнительного извлечения подземных вод для целей совместного использования;
- e) широкий план использования водных ресурсов, основанный на существующих условиях водообеспеченности;
- f) планирование регулируемого совместного использования подземных и поверхностных вод во времени и пространстве;
- g) определение и детализация областей, которые будут обеспечены водой из поверхностных или подземных источников как по отдельности, так и совместно;
- h) оценка неблагоприятных социально-экономических последствий совместного использования в долгосрочной перспективе.

4.4.1.11 **Использование воды низкого качества для орошения**

Вода считается пригодной для целей орошения, когда она не оказывает отрицательного осмотического или специфического токсичного воздействия на продукцию растениеводства, не содержит веществ, влияющих на химические или гидравлические свойства почвы и не вызывает ухудшения качества подземных или поверхностных вод. Эти неблагоприятные условия вызываются, в первую очередь, накоплением солей в корневой зоне растений. Соответственно, вода низкого качества может использоваться во время стадий роста, которые менее чувствительны к некачественной воде, особенно к солености, а также при обеспечении того, что не будет, или будет как можно меньше, накопления солей в корневой зоне. Это можно предотвратить либо путем выщелачивания с помощью регулярного подвода воды нормального качества, либо путем применения специальных методов орошения. В условиях недостатка воды или же её солености, капельные и т. н. питчерные методы орошения являются наиболее подходящими. При использовании этих методов соли не накапливаются у корней, поддерживается низкое напряжение почвенной влаги и, таким образом, растения защищаются от вредного воздействия.

Вода разного качества также может использоваться для орошения в условиях засушливого климата путем смешивания некачественной воды с водой хорошего качества в системе подвода воды для получения воды заданного качества, чтобы она соответствовала солеустойчивости растений. Возможно использование альтернативных способов орошения качественной и некачественной водой из различных источников, таких как вода канала и соленые подземные воды. У сельскохозяйственных культур различный уровень солеустойчивости.

Если соленость не может поддерживаться на приемлемом уровне с помощью вышеописанных методов, желательно выбирать сельскохозяйственные культуры или сорта, устойчивые к засоленности почвы, такие как овощи, ячмень, сорго, пшеница, томаты, и применять соответствующие приемы управления почвенными и водными ресурсами наряду с разумным использованием удобрений.

4.4.2 **Осушение сельскохозяйственных земель**

Осушение земель — это удаление растворенных солей и устранение избытка воды из корневой зоны и с поверхности земли в целях создания более благоприятных условий для роста растений. Осушение земель системами поверхностного и подземного дренажа практиковали ещё египтяне и греки в доисторические времена.

Для большинства проектов орошения по всему миру потребности в дренаже не были должным образом оценены и учтены. Неспособность реализовать потенциальные выгоды от проектов орошения часто связана с недостаточным вниманием к дренажу. Стоимость дренажа часто значительна и выступает в качестве сдерживающего фактора для инвестиций на начальных этапах планирования и осуществления проектов орошения. Неблагоприятные последствия неправильного осушения начинают появляться только через несколько лет работы ирригационной системы. Уделять внимание дренажу на данном этапе, как правило, уже слишком поздно и, следовательно, неэффективно.

4.4.2.1 **Цель осушения сельскохозяйственных земель**

Подтопление сельскохозяйственных угодий, в широком смысле, это состояние насыщения корневых зон сельскохозяйственных культур, ведущее к ограничению аэрирования, снижению уровня кислорода и повышению уровня углекислого газа. В жарких, засушливых климатических условиях в процессе испарения неглубоко залегающие подземные воды поднимаются вместе с растворенными солями на поверхность

почвы, что может увеличивать засоленность почв в течение многих последующих лет. Заболачивание и засоление почвы вредны для здорового роста растений и приводят к сокращению сельскохозяйственного производства. Причин заболачивания и засоления почв много. К ним относятся большое количество осадков, неблагоприятная топография, отсутствие естественного дренажа, низкая проницаемость почв, твердый почвенный слой на небольшой глубине, поступление морской воды, высокое испарение в течение длительных жарких и засушливых периодов, наличие солей в почве. Кроме того, дополнительные проблемы вызываются различными видами антропогенной деятельности: ненадлежащая организация земле- и водопользования при оросительных работах, использование некачественной воды для орошения, высокие утечки воды из оросительных систем, принятие неудовлетворительных систем земледелия, перекрытие природных стоков и проток в связи со строительством дорог, водоводов, мостов и железных дорог. Большая часть почв в засушливых регионах содержит соли. Индия, Индонезия, Ирак, Египет и Пакистан, например, имеют обширные участки заболоченных, засоленных земель. Освоение таких земель является дорогостоящим делом и имеет низкую экономическую отдачу.

Цель сельскохозяйственного дренажа — улучшение физического и химического состояния почвы в целях повышения её плодородности или поддержания на высоком уровне. Это достигается за счет удаления избыточных поверхностных и подземных вод, а также растворенных солей. Вода, которую следует удалить, может быть избыточной водой после оросительных работ, избытка атмосферных осадков и утечки из оросительного канала, системы хранения или орошаемых площадей, расположенных выше по течению. Большинство земель сельскохозяйственного назначения имеют естественные поверхностные и подземные дренажные системы определенной степени развития. Искусственный дренаж обеспечивается путем установки поверхностных и подземных систем дренажа для достижения следующего:

- a) поддержание соответствующего водного баланса и баланса питательных веществ на сельскохозяйственных землях;
- b) удаление излишков воды и стимуляция здорового роста сельскохозяйственных культур;
- c) восстановление аэрации корневой зоны;
- d) удаление излишков солей путём вымывания их на поверхность земли или выщелачивания;
- e) повышение доступности применяемых азотных удобрений путем минимизации денитрификации;
- f) уменьшение теплоемкости грунтовых вод;
- g) понижение уровня грунтовых вод;
- h) увеличение корневой зоны, из которой могут поглощаться питательные вещества.

4.4.2 Типы дренажа

Дренажные системы могут быть классифицированы как поверхностные, подземные или вертикальные.

4.4.2.1 Поверхностные системы дренажа

Поверхностный дренаж заключается в удалении избытка воды с поверхности земли посредством гравитационного потока, в основном, через открытые дрены и в результате земляных работ, чтобы предотвратить застой поверхностных вод. Удаление избытка воды достигается путем установки сети поверхностных стоков, которые связывают область осушения с основным отводом дренированных вод. Как правило, существует иерархическая структура, в которой наименьшим компонентом системы является трубчатая дрена, далее поперечная дрена, дренажный коллектор, вспомогательный и магистральный коллектор (см. рисунок II.4.14). В некоторых ситуациях изолированные заболоченные участки земли могут быть осушены посредством произвольно расположенных стоков. Трубчатые дрены небольшие, временные и закладываются неглубоко (< 15 см в глубину) с пологим уклоном к поперечным дренам.

Независимо от основной системы дренажа могут быть созданы дополнительные стоки, такие как отводящие и перехватывающие дрены. Отводящие дрены расположены рядом с источником утечки, например каналом или дренажным каналом. Перехватывающие дрены служат для перехвата поверхностных или подземных потоков из расположенных выше участков до момента достижения ими обрабатываемых земель, имеющих более низкие высотные отметки. Поверхностный дренаж больше подходит для маломощных почв и почв с низкой водопроницаемостью. Хотя системы поверхностного водоотвода обходятся дешевле, они требуют периодического обслуживания.

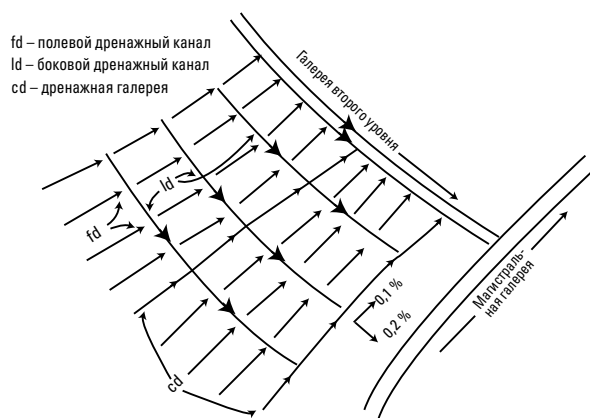


Рисунок II.4.14. Схема дренажной системы, показывающая иерархию компонентов

4.4.2.2 Системы подземного дренажа

Подземный дренаж включает в себя удаление избытка воды, находящегося в корневой зоне или вблизи ее, для того чтобы контролировать уровень грунтовых вод и уменьшить засоление почв. Системы подземного дренажа состоят из дренов или перфорированных труб или плиток, заложенных существенно ниже корневой зоны сельскохозяйственной культуры. Свободная вода насыщенного почвенного профиля вместе с растворенными солями стекает в подземные дрены, которые, в свою очередь, выходят в водоотвод или в коллектор. Там, где рельеф не способствует удалению сточных вод под действием силы тяжести, для их удаления в конце коллектора находятся отстойник и насос. Иерархическая структура системы поверхностного дренажа одинаково действенна и для подземных дренажных систем (см. рисунок II.4.15).

Использование подземных дренов является более подходящим на почвах с высокой проницаемостью. Почвенный слой незначительной толщины обладает низкой водопроницаемостью, в силу малых пор они легко забиваются коллоидным материалом, создающим помехи гравитационному потоку в системы дренажа и делающим эти системы неэффективными. Подземные дренажные системы на орошаемых землях в засушливых и полусушливых регионах подходят для выщелачивания растворенных солей из корневой зоны. Так как закрытые дрены заложены значительно ниже поверхности земли, нет потери пахотных площадей. Вместе с тем, в то время как первоначальная стоимость подземной дренажной системы больше, чем поверхностной дренажной системы, расходы на ее техническое обслуживание практически равны нулю, а срок эксплуатации — значительно дольше.

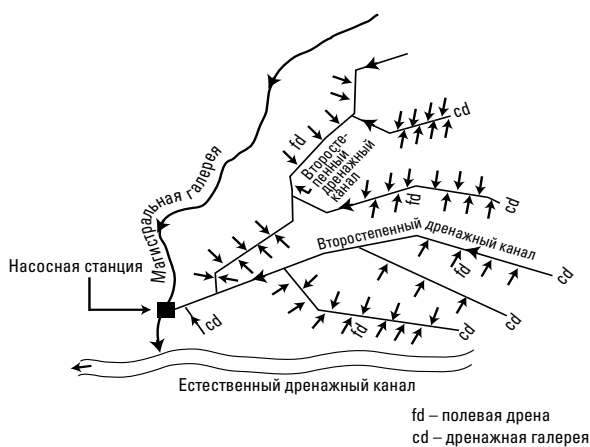


Рисунок II.4.15. Схема системы закрытого дренажа

4.4.2.3 Вертикальные дренажные системы

Вертикальная дренажная система включает в себя механическую перекачку воды через мелкие трубчатые колодцы, удобно спроектированные и установленные на местах. Многоцелевая система артезианских скважин, включающая в себя сеть близко расположенных мелких трубчатых колодцев, также может быть использована для обеспечения дренажа заболоченных регионов, особенно там, где планируется выкачивание соленой воды из более глубоких слоев, в случае если используется один трубчатый колодец более высокого расхода. Результатом действия такой системы является то, что все отдельные депрессионные воронки будут связаны и понизят уровень подземных вод на большой площади. Как правило, все скважины соединены одним насосом. Скорость откачки определяется в соответствии с безопасной глубиной, на которой должны быть сохранены грунтовые воды. Система может выкачать излишки воды с глубины двух метров, что является нормальной предельной глубиной систем подземного стока. Вертикальный дренаж нуждается в строительстве требующих больших затрат колодцев и в непрерывной подаче электропитания для откачки воды.

Другой формой вертикального дренажа является повышение суммарного испарения путем посадки соответствующей растительности. Для этой цели используются плантации эвкалипта, тополя и казуарины, которые испаряют влагу с высокой скоростью. Такой метод также называется биодренажем. Биодренаж особенно подходит для районов, имеющих выход к морю, где нет подходящих точек для сброса дренажных вод, либо они ограниченной мощности. Этот новый метод требует дальнейшего тестирования и оценки, чтобы определить его пригодность в конкретных ситуациях.

4.4.2.3 Проектирование систем осушения сельскохозяйственных земель

Оно включает в себя следующие шаги:

- a) Поверхностный дренаж
 - i) определение количества излишков воды, подлежащих дренированию;
 - ii) принятие решений о скорости отвода излишков воды;
 - iii) проектирование физических компонентов дренажной системы: выбор подходящего места выхода на основе сведений о существующих выходах и системах утилизации (естественные потоки); расположение и размеры стоков; проектирование выхода и вспомогательных структур управления;

- b) Подземный дренаж
 - i) определение количества излишков воды, подлежащих удалению, путем определения количества пополнения за счет осадков или избыточного орошения;
 - ii) определение гидравлического напора для стабильных и нестабильных условий состояния грунтовых вод;
 - iii) проектирование физических компонентов дренажной системы. Это включает в себя определение расположения и размеров дренажных труб; глубины, на которой трубы должны быть расположены; их наклона и выравнивания труб; месторасположения и выбора выхода и т. д.

Проектирование дренажных систем зависит от количества воды, которая должна быть удалена из сельскохозяйственных угодий за один день, с тем чтобы избежать повреждения сельскохозяйственных культур из-за заболачивания. Это называется коэффициентом дренажа и выражается в сантиметрах в день или в литрах в секунду с гектара. Значение коэффициента дренажа — это функция от характеристик атмосферных осадков, таких как их интенсивность и продолжительность, скорости стока, переносимости сельскохозяйственной культурой избытка воды и стадии ее роста.

Коэффициент дренажа является ключевым параметром разработки систем поверхностного и подземного дренажа. В случае подземных систем в стабильных условиях коэффициент имеет то же значение, что и для систем поверхностного дренажа. Однако, при нестабильных условиях потока, коэффициент дренажа для подземных систем — это скорость, с которой должен быть понижен уровень грунтовых вод.

Таким образом, водные свойства почвы, такие как инфильтрация, насыщенная гидравлическая проводимость и осушаемая пористость играют важную роль при проектировании систем осушения.

Глубина, на которой расположены подземные дрены, определяется на основе максимальной глубины корневой зоны и капиллярного поднятия воды в почве, которое, в свою очередь, зависит от состава почвы.

Подробная информация о практике проектирования и эксплуатации систем поверхностного и подземного дренажа может быть получена из обычных учебников по методам осушения. Международная комиссия по ирригации и дренажу выпустила несколько публикаций на эту тему.

4.4.3

Использование дистанционного зондирования и общих информационных систем в орошении и осушении

Последние достижения в области технологий дистанционного зондирования оказываются ценными в планировании и мониторинге оросительных и дренажных систем. Дистанционное зондирование может применяться для определения видов использования земельных угодий и районов, которые засеяны, орошаемы, заболочены или затоплены. Оно также может дать информацию о засоленности почвы, потребностях растений в воде, напоре воды и урожайности сельскохозяйственных культур. Использование информации, полученной с помощью методов дистанционного зондирования и связанной с географической информационной системой, рассматривается как будущее направление развития планирования и управления оросительными и дренажными системами.

Программное обеспечение «Landsat Thematic Mapper» (TM) и многоспектральный сканер SPOT (MSS) в сочетании с данными радиолокационных измерений, получаемыми с европейского спутника дистанционного зондирования с РЛС с синтезированной апертурой (PCA ERS-1), могут быть использованы для получения информации о землепользовании и посевных площадях. Временной нормализованно-разностный вегетационный индекс (НДВИ) может быть использован для мониторинга растительного покрова и роста сельскохозяйственных культур. Чтобы оперативно оценить годовые посевные площади, получить 10-дневный показатель урожая и количественные оценки состояния и продуктивности сельскохозяйственных культур, могут быть использованы снимки с низким разрешением, получаемые с помощью усовершенствованного радиометра очень высокого разрешения (AVHRR). В настоящее время национальные метеорологические службы в ряде стран регулярно предоставляют карты НДВИ, получаемые на ежемесячной основе по каналам для VIS, или видимой, и NIR, или близкой к ИК, областей спектра, для контроля роста растительности и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в помощь управлению орошением и осушением в реальном времени.

Существует множество литературы по использованию спутникового дистанционного зондирования при управлении системами орошения (Bastiaanssen, 1998; Musiak and others, 1995; Vidal and Sagardoy, 1995; Kurtas and Norman, 1996).

4.5 ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ [ГОМС К10, К15, К22, К45]

4.5.1 Общие положения

Человек всегда использовал энергию воды. Первое упоминание о ее применении в качестве механической силы восходит к греческой мифологии и связано с Геркулесом, который с помощью энергии речной воды чистил Авгиевы конюшни.

Движущая сила воды издавна преобразовывалась в механическую энергию для использования на водяных мельницах и фабриках. С момента появления электричества в конце XIX века стало возможным преобразование гидроэнергии в электроэнергию, которая может проще передаваться потребителям, находящимся на достаточно больших расстояниях от места ее производства. Потребление электричества, полученного на гидроэлектростанциях, быстрыми темпами росло в XX веке и, по оценкам на сегодняшний день, продолжит расти в будущем.

Преобразование движущей силы воды возможно двумя способами:

- a) использовать русловой речной сток (скорость текущей в русле водяной массы);
- b) использовать снижение гидравлического напора, что представляет собой преобразование потенциальной энергии в кинетическую энергию за счет изменения высоты.

Кроме этого, вода используется в энергетике для охлаждения на тепловых электростанциях, работающих на угле, мазуте, а также на ядерном топливе. При выработке термодинамической энергии вода требуется практически на всех технологических этапах — от бурения испытательных скважин при добыче нефти и газа до превращения ископаемого и ядерного топлива в электрическую энергию на тепловых электростанциях.

Важнейшее различие между производством электричества на гидро- и тепловых электростанциях заключается в характере водопотребления. На тепловых электростанциях вода будет использоваться для охлаждения: часть воды будет испаряться вырабатывающей энергией системой, а часть, имеющая температуру выше температуры забора, — отводиться. Гидроэлектростанция возвращает в окружающую среду количество воды, равное объему забора, за вычетом потерь на испарение из водохранилищ, но, как правило, с гидрологическими характеристиками, несколько отличными от естественных.

В бассейновом менеджменте на его ранних стадиях следует рассматривать каскады электростанций различного типа ввиду потенциально возможных конфликтов, связанных с интересами водопользователей. Последствия размещения этих установок различны: изменение стока, термальное загрязнение вод, сокращение видов рыб, испарение, отведение вод из водосборного бассейна или переброска в него, риск загрязнения и т. д.

4.5.2 Гидроэлектроэнергия

Гидроэлектроэнергия — это возобновляемый вид энергии, первоначально получаемый от солнца, которое определяет непрерывность гидрологического цикла (круговорота воды), обуславливающего течение вод в реках на протяжении тысячелетий. Гидроэнергетика использует эту энергию без какого-либо существенного изменения их количества и, следовательно, может быть охарактеризована как устойчивая энергетика в соответствии с определением устойчивого развития, данным Всемирной комиссией ООН по окружающей среде и развитию: «...развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего времени, не подрывая способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности».

Гидроэнергетические установки разнообразны не только из-за различия природных условий, к которым они должны быть адаптированы, но также из-за разнообразия обстоятельств, связанных с выработкой энергии и ее использованием. Гидроэлектростанция часто эксплуатируется в составе многоцелевого проекта, который предназначен для решения широкого круга водохозяйственных задач, например: регулирования паводков, судоходства, ирригации, городского и промышленного водоснабжения, рекреации, а также разведения рыб и диких животных. Более подробная информация о многоцелевых проектах содержится в разделе 4.1.

Проект редко ограничивается конкретной местностью. В большинстве случаев он затрагивает весь водосборный бассейн, вовлекая региональные, национальные и международные интересы. На стадии планирования любого проекта должны учитываться все водохозяйственные потребности региона и рассматриваться пути удовлетворения этих потребностей. Воздействие предлагаемого гидроэнергетического строительства на природные ресурсы и возможности удовлетворения различных потребностей региона, а также его потенциал удовлетворить эти потребности должны быть тщательно оценены.

Несмотря на то что масштабы гидроэнергетических проектов за последнее столетие значительное выросли, небольшие гидроэлектростанции мощностью

до нескольких мегаватт (МВт) могут вырабатывать дешевую энергию, будучи размещенными на малых водотоках, или часто могут быть интегрированы в комплекс существующих плотин или искусственных водных путей.

4.5.2.1 **Преимущества, недостатки и влияние на окружающую среду**

4.5.2.1.1 **Преимущества**

Хотя гидроэнергетические установки по всему миру удовлетворяют около 20 процентов мирового спроса на электроэнергию, их производительность выше, чем при производстве электроэнергии с использованием прочих источников. Они используют энергию, запасы которой почти во всех странах подвержены рискам, связанным с изменчивостью и изменением климата, но не с политическими или экономическими рисками. Гидроэнергетика особенно важна как экономический стимул в развивающихся странах и как значимая часть комплексных энергетических систем в более развитых в промышленном отношении странах. Значимость гидроэлектрической энергии не будет уменьшаться по следующим причинам:

- a) она получается из непрерывно возобновляемого ресурса, пополняемого за счет энергии солнца;
- b) она не загрязняет природную среду — ни значительное тепло, ни токсичные или «парниковые газы» не выделяются при ее выработке;
- c) КПД гидроэлектростанций может достигать 95 процентов, тогда как тепловые станции, работающие на жидком или твердом топливе, имеют КПД не более 30–40 процентов;
- d) гидроэлектростанции, при условии надлежащего технического обслуживания, имеют длительный эксплуатационный период;
- e) технология выработки энергии на ГЭС является совершенной, обеспечивающей надежную и гибкую эксплуатацию, а оборудование ГЭС легко адаптируется к местным условиям;
- f) вода в водохранилищах обеспечивает «хранение» энергии и может быть доступна для других целей;
- g) гидроэлектростанции способны реагировать в течение минут на изменение требований к выработке энергии;
- h) выработка гидроэлектроэнергии не требует затрат на топливо, а низкая цена эксплуатации и технического обслуживания ГЭС означает высокую защищенность от инфляции;
- i) гидроэлектроэнергия заменяет горючее топливо, которое либо должно импортироваться, либо, в случае его производства внутри страны, может экспортироваться, благодаря чему улучшится платежный баланс;
- j) гидроэнергетика создает рабочие места в период возведения сооружений, эксплуатации и технического

обслуживания гидроэнергетических объектов, активизируя экономическую деятельность на национальном и региональном уровнях.

4.5.2.1.2 **Недостатки**

Вместе с тем гидроэнергетике присущи некоторые недостатки, а именно:

- a) капитальные вложения относительно высоки;
- b) возможности поэтапного строительства из-за растущего спроса на электроэнергию ограничены в основном из-за необходимости внесения значительных инвестиций в самом начале строительства гидротехнических сооружений на реке;
- c) место производства и центры потребления зачастую удалены друг от друга;
- d) сооружение гидроэлектростанций — длительный процесс;
- e) реки и озера не являются частной собственностью, и решение о развитии гидроэнергетики должны приниматься на государственном уровне, что влечет за собой проведение трудных политических переговоров — планирование, строительство и возврат инвестиций могут растянуться на несколько десятилетий;
- f) возможное нарушение естественных ареалов и потеря биологического разнообразия.

4.5.2.1.3 **Влияние на окружающую среду**

Гидроэнергетические установки, несомненно, оказывают влияние на окружающую среду, описанное в разделе 4.2.8, а именно в подразделе 4.2.8.3.

В частности, могут проявиться следующие виды влияния:

- a) изменение режима потока реки;
- b) перераспределение накопленного объема воды между сезонами;
- c) неестественно скоротечные значительные изменения расхода воды;
- d) затопление выше расположенных территорий.

В этой связи необходимо оценить иные виды водопользования в зонах верхнего и нижнего бьефов планируемого гидротехнического сооружения, с тем чтобы учесть их при проектировании и эксплуатации установки.

4.5.2.2 **Типы установок**

Достаточно трудно классифицировать гидроэнергетические установки, поскольку они индивидуальны и в каждом случае адаптированы к геоморфологическим условиям реки, ее гидравлическому режиму и потребностям определенного района или страны в целом.

Ниже предпринята попытка классифицировать их в зависимости от местоположения на реке и режима эксплуатации:

- верховья реки обычно имеют значительные уклоны (см. гипсометрические кривые на рисунке I.2.21, том I, глава 2), а сток меженного периода имеет высокую изменчивость. Соответственно, в таких условиях обычно возводится высоконапорная гидроэлектростанция;
- в среднем течении реки уклоны умеренные, но сток устойчивее. Это приведет к строительству средненапорной гидроэлектростанции;
- нижняя часть течения часто бывает широкой с незначительным уклоном, но с постоянным расходом, что удовлетворяет условиям установки низконапорных или русловых гидроэлектростанций;
- последняя категория установок включает насосные гидроаккумулирующие станции.

4.5.2.2.1 Мощность установки

Гидроэлектрическая энергия вырабатывается путем преобразования энергии воды, падающей с более высокого на более низкий уровень, в механическую энергию, воздействующую на лопасти генератора турбины, и затем в электрическую энергию через возбуждение ротора и статора генератора. Энергетический потенциал участка в кВт·ч является функцией расхода и напора, как показано ниже, а его точное выражение имеет следующий вид:

$$P = 9,81\eta QH \quad (\text{в кВт}), \quad (4.7)$$

где η — показатель эффективности работы станции; Q — расход воды, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; а H — напор высоты падения воды в метрах, который представляет собой разницу уровней воды нижнего и верхнего бьефов.

Таким образом, необходимо знать запланированную производительность установки и иметь четко определенные компоненты проекта. В рамках подготовительных работ и определения размеров установки может использоваться следующая формула, достаточно точно аппроксимирующая величину мощности;

$$P = 8,5QH, \quad (4.8)$$

где Q расход (в $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$), а H — напор высоты падения воды (в метрах).

4.5.2.2.2 Высоконапорные гидроэлектростанции

Такие электростанции (см. рисунок II.4.16) характеризуются специфической гидрологией в силу своего расположения вблизи истока реки, часто в высокогорье, где водосборы невелики. Гидрологический режим будет типичен для таких мест: существенная сезонная

изменчивость стока, непосредственно обусловленная высокой интенсивностью дождей в горной местности, а на больших высотах — снеготаянием. В результате наблюдаются периоды как очень высокого, так и очень низкого стока. Поэтому плотина должна обеспечивать задержание воды в период очень высокого стока, с тем чтобы ее можно было использовать в периоды спроса на электроэнергию. В случае если высокий сток вызван таянием снега, водохранилище должно иметь достаточно большие размеры для того, чтобы вместить всю воду, аккумулированную в снежном покрове выше по течению.

Способы определения размеров водохранилищ описаны в разделе 4.2. Из-за значительных уклонов реки водохранилище может быть сооружено так, чтобы обеспечить достаточно большую величину высоты падения между уровнями турбин и водохранилища без необходимости перемещения воды на большие расстояния. В таких случаях возможно вырабатывать большое количество гидроэлектроэнергии, несмотря на относительно низкие расходы (см. уравнение 4.7). Это отношение для высоких плотин может быть представлено следующим образом:

$$P = 9,81\eta QH. \quad (4.9)$$

Сооружения такого типа могут запасать воду и, таким образом, осуществлять перераспределение воды между сезонами, а дополнительно к этому — поддерживать скорости потока на уровне, необходимом для удовлетворения спроса на электроэнергию в периоды низкого стока.

4.5.2.2.3 Средненапорные гидроэлектростанции

В среднем течении реки поток уже более установившийся, чем в верховьях, а уклон по-прежнему достаточно велик для того, чтобы обеспечить полезный напор порядка 40–100 метров. По этой причине можно установить плотину, которая позволит задержать часть воды в периоды низкого электропотребления: в ночное время, в часы низкой активности или в нерабочие

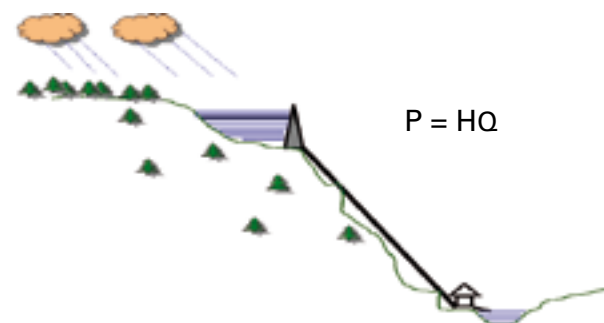


Рисунок II.4.16. Высоконапорная гидроэлектростанция

дни (см. рисунок II.4.17). Более того, в периоды высокого потребления электроэнергии, запасенная вода может сбрасываться через турбины с расходом, превышающим норму. Такой тип эксплуатации может осуществляться на суточной, недельной или месячной основе.

Мощность такой установки может быть выражена следующим образом:

$$P = 9,81\eta QH. \quad (4.10)$$

4.5.2.2.4 *Русловые гидроэлектростанции*

Установка такого типа, также известная как низконапорная электростанция (см. рисунок II.4.18), не обеспечивает запас воды для последующего использования и производства гидроэлектроэнергии и полностью зависит от скорости течения реки. Часть потока или весь поток проходит через турбины и немедленно возвращается в реку. Таким образом, скорость потока не претерпевает каких-либо изменений. Если турбина останавливается в случае отсутствия спроса на электричество или необходимости ее ремонта, поток должен быть направлен по альтернативному пути с помощью затворов или обводного канала. Отведенная таким образом вода не используется для выработки электричества. Поскольку русловые гидроэлектростанции действуют непрерывно, для проектирования размера турбин и прочих характеристик установки требуется детальное исследование гидрологического режима потока.

Продолжает расти количество плавучих мельниц на больших реках. Для их изготовления используются водяные колеса, которые приводят в действие генераторы переменного тока. Мельницы устанавливаются на баржах, и их положение в русле фиксируется с помощью тросов и лебедок. Их достоинство в том, что они поднимаются или опускаются в соответствии с изменением уровня воды и могут быть возвращены к берегу для технического обслуживания или в период

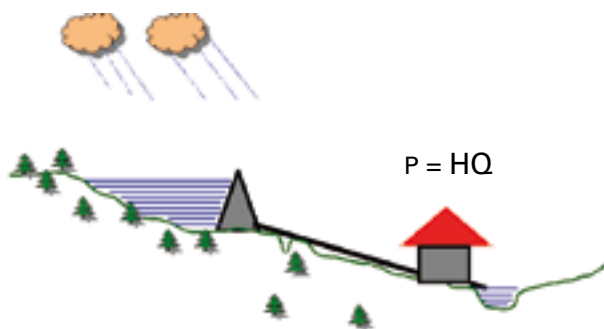


Рисунок II.4.17. Средненапорная гидроэлектростанция

паводков и всегда могут быть расположены там, где скорость потока максимальна. Кроме того, капиталовложения в них довольно скромные, а необходимое генерирующее оборудование небольших размеров и может быть произведено на местах. Нет необходимости в проведении гидротехнических работ в русле, требуется только установить лебедки на берегах. Их существенный недостаток — низкий КПД лопастных колес, составляющий от 30 до 50 процентов.

4.5.2.2.5 *Насосные гидроаккумулирующие станции*

Сделать большие запасы электричества невозможно. Но возможно электричество, произведенное в периоды низкого спроса на него, использовать для поднятия воды насосами и сохранения ее в резервуаре на значительной высоте над уровнем реки. Когда спрос на электроэнергию вновь увеличится, можно сбросить воду через турбины для производства электричества. КПД всей операции составляет около 70 процентов, но это выгоднее чем потеря используемой для поднятия воды электроэнергии в случае остановки низконапорных турбин. Станции такого типа напоминают высоконапорные электростанции и часто насосы, будучи насосами обратного действия, используются в качестве турбин. Производительность их может быть не столь высока, но она важна ввиду колебаний ее доли в общем объеме электроэнергии, вырабатываемой на данной территории или в данной стране.

4.5.2.3 *Структура гидроэлектростанции*

Любая гидроэлектростанция включает в себя несколько структур, которыми последовательно сверху вниз по течению являются соответственно: водозабор, подводящий канал, напорный трубопровод, электростанция, отводящий канал или водосброс, и вспомогательные структуры, такие как рыбоходы и система подвода компенсирующих вод. См. рисунок II.4.19.

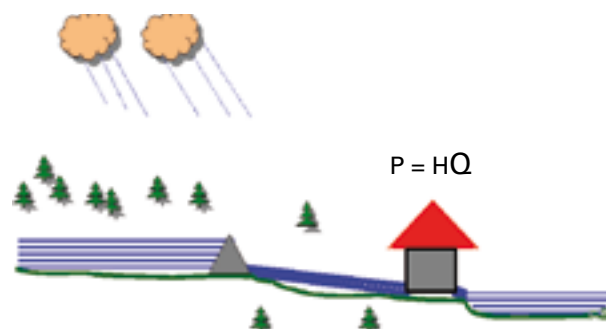


Рисунок II.4.18. Низконапорная гидроэлектростанция

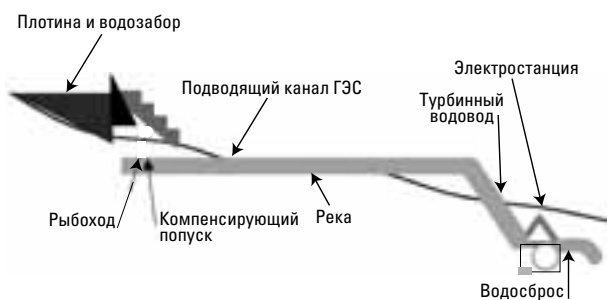


Рисунок II.4.19. Схема гидроэлектростанции

4.5.2.3.1 Водозабор

Водозабор (см. рисунки II.4.20 и II.4.21) необходим для отвода воды из русла и направления ее на турбины. Водозабор располагается по возможности ближе ко дну и часто встроен в плотину.

Необходимо отметить следующие принципиальные правила:

- водозабор должен располагаться в реке таким образом, чтобы плавающие объекты не могли заблокировать его;
- водозабор должен быть снабжен защитной сеткой для предотвращения попадания предметов и рыбы в турбины и дальнейшего их перемещения в электростанцию. Во втором случае расстояние между прутьями решетки должно обосновываться местными требованиями и не должно превышать нескольких сантиметров;
- площадь поверхности решеток должна быть такой, чтобы вода проходила через нее без значительных потерь напора.

При необходимости, следует установить систему для удаления плавающих объектов, часто накапливающихся выше водозабора.

4.5.2.3.2 Подводящие каналы

Подводящий канал направляет поток к гидроэлектростанции, которая зачастую располагается далеко от водозабора с целью получения максимально возможной выгоды от использования разницы высот между уровнем водозабора и уровнем отводящего канала. Каналы могут представлять собой либо открытые, либо закрытые сооружения, или туннели с трубопроводами с открытой или закрытой поверхностью потока.

Сток по открытым каналам возможен только в том случае, если подводящий канал идет от верхней части плотины; начальная часть подводящего канала в значительной мере зависит от рельефа местности. В целом уклон открытых каналов не велик и скорость движения вода не превышает $2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Открытые каналы часто заканчиваются напорным трубопроводом или турбинным водоводом (см. рисунок II.4.21), который направляет воду из канала или туннеля вниз на турбины под большим уклоном. Все эти структурные сооружения снабжены затворами, чтобы отделить водный поток и изолировать их от реки для инспектирования и технического обслуживания. Дополнительные устройства, такие как уравнильные резервуары или напорные трубы, устанавливаются для выравнивания случайных чрезмерных повышений давления.

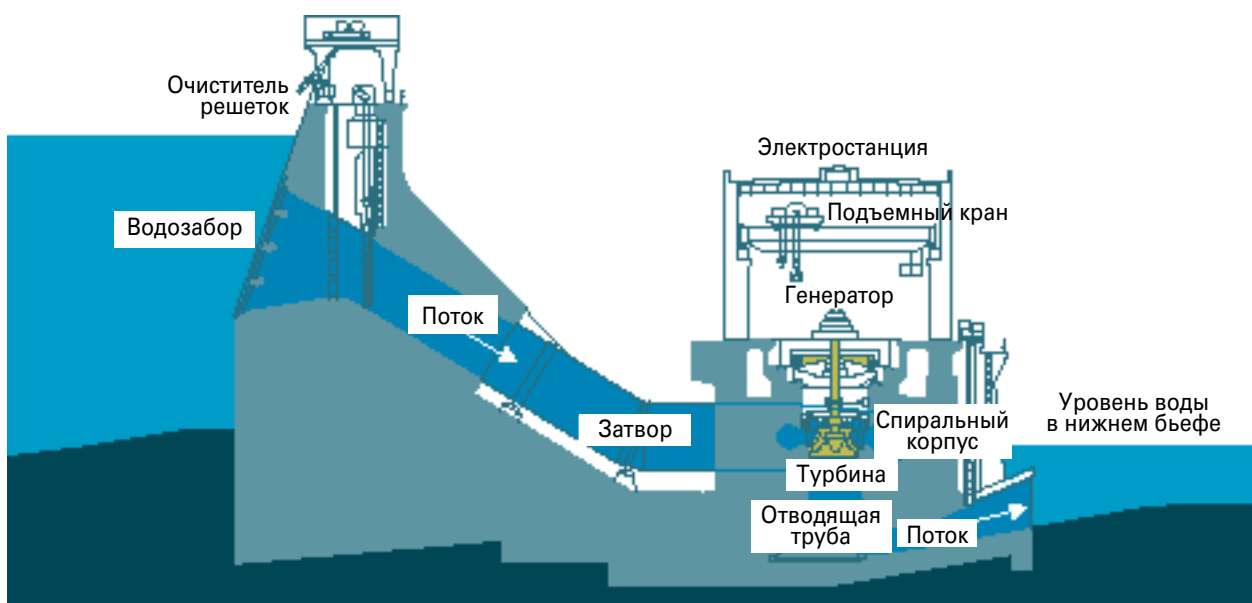


Рисунок II.4.20. Пример водозабора в дамбе

Напорные трубопроводы часто изготавливаются из металла, но также могут быть выполнены из железобетона, противударного бетона или, как раньше, из досок, собранных в виде канала.

4.5.2.3.3 **Электростанция**

Электростанция — это здание или подземное помещение, в котором установлено генерирующее оборудование: турбины и генераторы переменного тока. Оно должно удовлетворять размерам генерирующих устройств и в большинстве случаев здесь должны размещаться помещения для технического обслуживания и ремонта. Обычно электрическое оборудование, такое как трансформаторы напряжения и клеммы электрических кабелей, питающих систему, также размещаются в помещении электростанции. План типовой электростанции представлен на рисунке II.4.22

4.5.2.3.4 **Отводящий канал или водосброс**

Отводящие каналы необходимы для возврата вод в реку после прохождения через турбину. Та их часть, которая связывает электростанцию с рекой, зависит, прежде всего, от типа турбины и, следовательно, величины падения напора. Водосбросы очень часто снабжены воротами для изоляции их от реки в случае крайней необходимости. Если на реке построен каскад гидроэлектростанций, водосбросной канал одной из них может непосредственно являться водозабором расположенной ниже по течению гидроэлектростанции.

4.5.2.3.5 **Вспомогательные сооружения**

На гидроэлектростанциях часто возникает необходимость строительства сооружений, которые непосредственно не требуются для производства электричества,



Рисунок II.4.21. Пример частично заглубленного напорного трубопровода

но нужны для регулирования водного режима и соответствия указаниям. Примеры включают следующее:

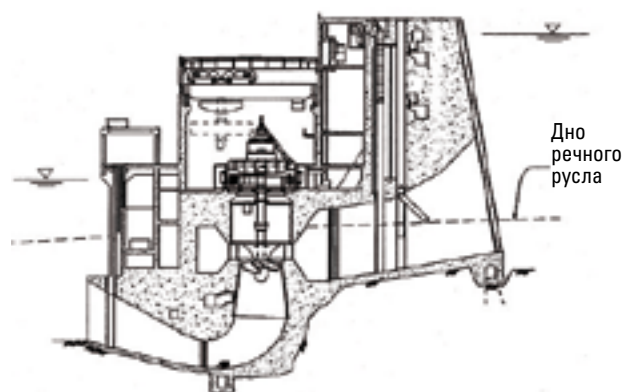
- a) рыбоходы (см. рисунок II.4.23) — для обеспечения миграции рыб в обход плотин без угрозы гибели на турбинах;
- b) компенсирующие водные системы — для возврата части расхода воды непосредственно к основанию плотины. Это предотвращает течение реки между водозабором и оголовком водосбросного канала — короткозамкнутый участок — от осушения и сохраняет жизнь водным организмам реки, а также делает возможным иное использование вод в пределах короткозамкнутого участка. На этом участке необходимо поддержание постоянного потока в русле на уровне, установленном государственными регламентами или потребностями других водопользователей.

4.5.2.3.6 **Особо оговоренные условия**

Все чаще на небольших и средних гидроэлектростанциях все эти сооружения помещают в пределах плотины гидроэлектростанции. Достоинство такого подхода заключается в уменьшении длины подводящих каналов и сокращении короткозамкнутого участка до нуля. Такие устройства могут пропускать постоянный расход воды в реку при одновременном непрерывном производстве электричества. Однако это не представляется возможным без строительства дамбы и такой морфометрии русла, которая обеспечивает достижение требуемого падения напора в выбранном месте.

4.5.2.4 **Определение расхода гидроэлектростанции**

Надежная оценка выработки электроэнергии в выбранном створе в большой степени зависит от типа гидроэлектростанции, которую планируется построить,



Исследование осуществимости проекта по миграции мальков в низовьях реки Снейк
Здание гидроэлектростанции на гранитном основании

Рисунок II.4.22. План стандартного здания гидроэлектростанции



Рисунок II.4.23. Пример рыбохода из прудков и сливных порогов, позволяющий рыбе обходить дамбу и достигать более высокого уровня воды через ряд низконапорных плотин

и от гидрологических особенностей речного бассейна, расположенного выше по течению. Гидрологическое исследование реки в месте расположения гидроэлектростанции должно быть по возможности всесторонним и содержать следующую информацию, которая позволяет определить необходимые для гидроэлектростанции характеристики потока:

- a) данные о ежедневных или ежемесячных расходах воды за достаточно продолжительный период времени — не менее 10 лет, предпочтительно за 30 лет, если возможно;
- b) кривая обеспеченности речного стока или кривая повторяемости речного стока;
- c) исторические данные о паводках вблизи места строительства;
- d) рассчитанный гидрограф половодья;
- e) значение среднегодового расхода;
- f) минимальный ежегодный сток;
- g) требования к минимальному стоку в нижнем бьефе, непосредственно у плотины;
- h) данные о перебросках речного стока выше створа плотины или о водозаборах;
- i) площадь водосбора;
- j) потери на испарение с поверхности проектируемого водохранилища;
- k) зависимость уровень–расход непосредственно за проектируемым створом;
- l) сбросной гидрограф расчетного паводка;
- m) тарифовочные кривые для плотины, водослива и водовыпуска;
- n) цели проектирования, имеющийся запас воды и потенциальные правила эксплуатации;
- o) потери на фильтрацию, рыбохозяйственные требования и переброски воды из водохранилища;

- p) информация о продолжительности стояния уровней в водохранилище;
- q) данные о ежегодных максимальных расходах для оценки рисков, связанных с конструкцией водослива.

Кривая обеспеченности стока или кривая повторяемости стока, приведенная на рисунке II.4.24, систематизирует среднесуточные расходы среднего гидрологического года (см. главу 5) и широко используется на стадии подготовительного проектирования. Она показывает количество дней в году или частоту ежегодной повторяемости, с которой расход данной величины повторяется или превышает, что позволяет оценить потенциальную мощность гидроэлектростанции как функцию обеспеченности расхода воды. В свою очередь, возможна оценка доходности инвестиций.

Использование данного подхода позволяет смоделировать различные стратегии производительности выработки гидроэлектроэнергии станцией в зависимости от физического проектирования плотины и количества устанавливаемых турбин. Кроме того, возможно учесть требования прочих водопотребителей, такие как величина минимального стока, ирригационное или питьевое водоснабжение.

Непосредственное использование этой кривой, как показано на рисунке II.4.25, просто: для значения минимального расхода $50 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (жирная линия) и гарантированного расхода гидроэлектростанции $180 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (пунктирная линия), речной сток, который возможно использовать данной электростанцией, ограничен этими двумя линиями в соответствии с кривой обеспеченности (синяя линия).

Другими словами, этот рисунок демонстрирует, что гидроэлектростанция будет способна функционировать на протяжении 92 процентов времени года, т.е. 336 дней, когда расход реки выше $50 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Однако для 40 процентов продолжительности года, или 146 дней, сток реки будет превышать максимальный расход,

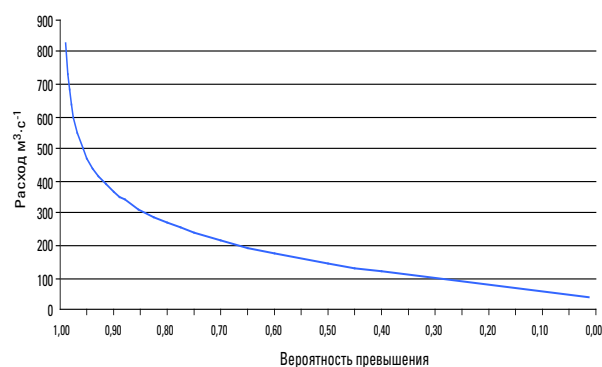


Рисунок II.4.24. Кривая распределения ежедневных расходов (по многолетним данным)

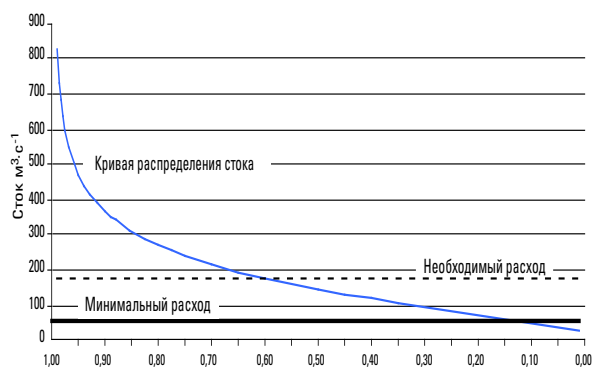


Рисунок II.4.25. Пример использования кривой распределения стока

который может быть пропущен через турбины; поэтому воду придется сбрасывать вхолостую через водослив, если только водохранилище не имеет объема, достаточный для хранения избытков речного стока.

В случае если подобная кривая рассчитана исключительно по значениям среднемесячных расходов, она может быть полезна для исследования влияния плотины на высокий и низкий сток, но объем речного стока, который может быть пропущен через турбины, будет завышен, а следовательно, и доходность системы. Эта ошибка весьма распространена и непосредственно затрагивает инвесторов таких гидроэнергетических систем; вот почему важно собрать и использовать информацию об ежедневных средних расходах.

Кроме того, поскольку эти кривые являются многолетними средними, по ним можно получить только среднее значение на выбранную дату. Полезный объем будет иметь существенную межгодовую изменчивость, так как сток реки зависит от количества осадков, которое так же изменяется из года в год. В случае если первые годы начального периода эксплуатации гидроэлектростанции будут засушливыми, окупаемость инвестиций отсрочится. Инвесторов следует поставить в известность об этих рисках, которые необходимо учитывать при расчете полной стоимости. С этой целью при планировании работы гидроэлектростанции часто необходимо использовать ежедневные данные за несколько прошлых лет.

Рекомендации и методы, представленные в настоящем Руководстве, обеспечивают надлежащую основу для изучения гидрологических характеристик территории. В случае отсутствия данных о речном стоке допускается использование данных, полученных в результате применения моделей осадки-сток или по бассейнам — аналогам, но в этом случае, при определении потенциальной производительности и времени возврата вложенных средств, следует принимать во внимание привносимую использованием таких данных дополнительную неопределенность.

Прочие методические подходы анализа гидрологических данных с целью получения надежной информации для целей проектирования представлены в главе 6. В Справочном пособии Гидрологической оперативной многоцелевой системы (ГОМС) (см. раздел К) имеется информация о программном обеспечении для реализации вышеуказанных методов на ЭВМ.

4.5.2.5 Определение напора

Напор гидроэлектростанции зависит от географических и топографических характеристик местности. Важно различать следующие параметры:

- полный напор, который представляет собой разницу между уровнями воды выше водозабора и в месте сброса вод в реку ниже по течению, или в случае применения частично погруженной лопастной турбины с высотной отметкой оси вала;
- напор высоты падения воды — давление, оказываемое водой на турбину при прохождении через нее. Он получается вычитанием из полного напора всех потерь энергии, включая потери потенциальной энергии в результате трения, вызванного такими компонентами как решетки, затворы и трубопроводы. Эти энергетические потери зависят от скорости воды на входных отверстиях и могут достигать нескольких десятых метра в случае больших напоров.

Таким образом, напор высоты падения воды, который определяет мощность агрегата, постоянно изменяется. Он зависит от следующих параметров:

- уровень воды верхнего бьефа, который подвержен внутригодовой изменчивости для многих станций и плотин;
- сток через турбины, зависящий от потребности в электричестве;
- расход реки или ее сток, который может вызвать повышение уровня воды в нижнем бьефе, например во время паводков, когда через водослив проходит значительное количество воды. Такое случается, когда величина полного напора недостаточна для вращения турбин в период паводков.

Напор высоты падения воды должен быть ниже полного напора. Он может быть вычислен сразу после принятия инженерных решений, касающихся ключевых компонентов установки. Предлагаемая для использования на стадии предварительного проектирования формула (см. уравнение 4.8) учитывает только средние потери энергии, наблюдаемые на многих гидроэлектростанциях. Для более точного определения выработки энергии во многих случаях необходимо оценивать ежедневную производительность станции и определять среднее значение напора высоты падения воды.

Таким образом, мощность гидроэлектростанции существенно изменяется в соответствии с преобладающими гидравлическими условиями, но для простоты рассмотрения максимальная производительность станции всегда представляется как количество электричества, выработанное при максимальном стоке при наивысшем значении напора высоты падения воды.

4.5.2.6 Производительность генерирующей станции

Количество электричества, выработанное гидроэлектростанцией, — самый важный из требующих определения факторов, поскольку знание его позволяет оценить годовую доходность системы и, следовательно, ее финансовую жизнеспособность. Производительность системы можно определить через мощность в кВт·ч:

$$E = \sum P_i t_i, \quad (4.11)$$

где E — количество электричества в кВт·ч, а P_i — мощность станции в течение рассматриваемого периода t_i .

Мощность определяется величинами напора высоты падения воды в заданный момент и расхода воды в тот же момент. Рассчитать ее можно по среднему значению напора высоты падения воды, зависящего от среднего расхода за гидравлически относительно однородный период.

Для расчета прибыли необходимо определить не только количество произведенной электроэнергии, но также и график ее выработки, соотношенный с ценами реализации, поскольку рыночные цены на электричество изменяются.

В этой связи желательно установить фиксированные цены для различных периодов на рассматриваемой территории и оценить производительность гидроэлектростанции в соответствии с ценами каждого ценового периода и в соответствии с полезным расходом потока за эти периоды. Такое исследование, хотя и выполняется экономистами, основано на данных о выходной продукции прогностических моделей, разрабатываемых гидрологами.

На подготовительных этапах проектирования и на территориях с ограниченным количеством рассматриваемых гидроэлектростанций производительность выработки электроэнергии за определенный период может быть рассчитана по следующей формуле:

$$E = 8 AH/3600, \quad (4.12)$$

где E — энергия в кВт·ч, произведенная за определенный период, A — полезный объем в м³ за выбранный период, а H — полный напор в метрах.

Эта упрощенная формула учитывает средние энергетические потери гидроэлектростанций, а также среднюю эффективность всех установленных узлов. Обычно применение этой формулы обеспечивает точность расчета около 5 процентов.

4.5.2.7 Качество воды

Качество воды в большинстве случаев не является основным предметом рассмотрения гидроэнергетических проектов, хотя они могут влиять на него. Различные исследования и недавние эксперименты показывают, что некоторые озера могут эвтрофироваться либо в силу того, что они использовались в качестве приемника городских или промышленных сточных вод, или из-за того, что в период строительства дамбы затопленная территория не была очищена или обезлесена надлежащим образом. Гниение растительности способно значительно уменьшить количество растворенного кислорода, тем самым существенно ограничить развитие водных организмов. Необходимо особенно ответственное рассмотрение проблемы в том случае, если в рассматриваемой зоне имеет место рыбоводство или другие виды водохозяйственной деятельности.

В результате вода может стать кислой и агрессивной до такой степени, что способна разрушить лопасти ротора и другие части турбины (см. раздел 4.9, в частности подраздел 4.9.2.2). Еще опаснее может быть сброс вод с низким содержанием кислорода в нижний бьеф, что может погубить водную флору и фауну на протяжении нескольких километров, приведя к прекращению рыболовства.

Другая опасность связана с отложением наносов в водохранилищах: наносы, поступающие в водохранилище с водами реки, опускаются на дно из-за уменьшения скорости воды, и затем их твердая фаза откладывается на дне водоема. Эти наносы могут содержать загрязняющие вещества, такие как тяжелые металлы: свинец, мышьяк, медь, концентрация которых в водоеме может достигнуть опасного уровня.

В определенных случаях путем промывки водохранилища попусками высоких расходов воды донные отложения могут быть удалены из него и возвращены в реку. Однако в целях недопущения нанесения вреда расположенным в нижнем течении реки участкам, проведение подобной операции требует внимательного рассмотрения.

4.5.2.8 Стадии гидроэнергетического проекта

Строительство гидроэлектростанции должно проводиться в строгом соответствии с четким планом с тем, чтобы не упустить какие-либо важные моменты и точно оценить доходность инвестиций, которые будут значительны, особенно в случае необходимости возведения плотины. Время финансовой окупаемости небольшого комплекса, например русловой гидроэлектростанции с простой плотиной, может составить от 8 до 10 лет, в то время как для крупных комплексов — от 30 до 50 лет. В этой связи качество исследования зависит от двух основных факторов:

- a) гидрологических исследований, на основе которых анализируются потенциальная производительность и ежегодные риски;
- b) геофизических исследований, используемых для выбора наилучшего места расположения гидроэнергетического объекта, чтобы получить максимально возможный в выбранном створе напор.

4.5.2.8.1 Гидрологические исследования

Как отмечено ранее, такое исследование должно быть, по возможности, самым полным и охватывать все методы определения речного стока и другие характеристики, с тем чтобы оценить неопределенность расчетов. Требуется располагать информацией о ежедневных или, как минимум, еженедельных расходах воды. Кроме того, весьма важно иметь представление о факторах риска, связанных с использованием осредненных данных, так как в этом случае может быть не учтен паводок, который может оказаться слишком высоким для сработки его через турбины и должен быть пропущен через водосливы. Так, среднемесячный расход воды $100 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ может быть результатом как средних расходов воды $30 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ за 28 дней, так и расхода $1\,080 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ в течение двух дней, или даже быть обусловленным плавно изменяющимся от $120 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ до $80 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ расходом. Каждый из рассмотренных случаев будет по-разному отражаться на количестве выработанной в течение месяца энергии.

Необходимо провести тщательное изучение повторяемости паводков с целью определения объема работ, которые потребуется выполнить для использования максимальных расходов воды без ущерба плотине или гидроэлектростанции. Необходимо также оценить величину стандартного проектного паводка, представляющего собой максимальный паводок, который возможно пропустить без ущерба для объекта; более высокий паводок способен вызвать серьезные повреждения гидроэнергетической установки. Во многих странах стандартные проектные расходы определяются установленными правилами и рассчитываются в соответствии с факторами риска в нижнем бьефе.

Исследование паводочного стока необходимо не только для того, чтобы представлять размеры водосливов, но и для размещения оборудования высокого напряжения, включая саму гидроэлектростанцию. К сожалению, в результате неудовлетворительного изучения максимального стока гидроэлектростанции иногда затапливаются, а электрические установки разрушаются под воздействием паводков обеспеченностью несколько десятых процента в год.

И наконец, гидрологическое исследование, чтобы считаться всеобъемлющим, должно рассматривать разнообразные виды водопользования, а также в какой степени гидроэлектростанция позволит удовлетворить их потребности. Необходимо также принимать во внимание различные моменты, вызывающие проблемы для стока и имеющие отношение к существующим конструкциям, например мосты, мельницы, плотины и броды, в зоне влияния водохранилища и в нижнем бьефе гидроэлектростанции. Очевидно, по мере реализации проекта должен возрастать объем предоставляемой информации. Для этого потребуются затратить значительные средства на подготовительном этапе проекта. Если не обеспечить предоставление таких средств и выполнение соответствующего гидрологического исследования, то рентабельность всего проекта будет под угрозой с вероятной потерей крупных капиталовложений.

При расчете необходимых гидрологических элементов важно помнить о величине стока, который необходимо будет направить на удовлетворение потребностей различных водопользователей, и одновременно определить, сможет ли этот речной сток быть пропущенным через турбины для выработки электроэнергии. В этом случае следует решить — когда и как, иначе он должен быть изъят выше подводящего канала. Результаты таких исследований могут существенно изменить финансовую жизнеспособность проекта. Как правило, в эти исследования вовлекаются региональные и государственные органы власти.

4.5.2.8.2 Геофизические исследования

Помимо гидрологических данных для определения потенциального напора воды необходимо получить по возможности максимальный объем информации. Как правило, для выполнения геофизических исследований используются планы, существующие обзоры или карты среднего масштаба, но они должны быть дополнены полевыми съемками. Полученная в полевых условиях информация важна для определения места расположения плотины и водозабора, выбора лучшего местоположения гидроэлектростанции, принятия решения о наиболее экономичном способе их соединения.

Такие полевые изыскания также важны для определения натуральных отметок имевших место паводков, для выявления различных водопользователей в регионе и выяснения, включает ли территория потенциального расположения водохранилища зоны возможной потери воды на инфильтрацию или территории, на которых потребуется сохранение флоры и фауны.

4.5.3 **Функционирование гидроэлектрической системы**

Функционирование гидроэлектрической системы имеет весьма сложный характер. Оно определяется как проектной мощностью, так и спросом на электроснабжение. Необходимо найти баланс между выработкой электроэнергии в настоящее время и в будущем, поскольку выработка значительного объема электричества в настоящее время может привести к дефициту выработки электроэнергии в будущем. Однако низкий уровень ее выработки в настоящее время может привести к избыточному запасу воды в будущем, который позднее потребует сработать. Поэтому необходимо использовать процедуру моделирования, которая оптимизирует водоиспользование, максимально увеличивая выгоду и минимизируя затраты. См. раздел 4.2 для дополнительной информации.

4.5.4 **Сопутствующие энергетические проекты**

Как отмечено в начале данного раздела, хотя, в основном, вода используется для выработки электроэнергии на гидроэлектростанциях, она также необходима для производства термоэлектрической энергии. Ниже приводятся руководящие материалы по количеству и качеству воды, необходимой для различных процессов выработки термоэлектрической энергии.

4.5.4.1 **Производство электроэнергии с использованием ископаемого и ядерного топлива**

Виды использования воды при производстве электроэнергии с применением ископаемого или ядерного топлива сходны между собой. На всех тепловых электростанциях вода используется для выработки пара, в охлаждающей системе и, в меньшей мере, для удовлетворения основных служб, например в питьевых системах водоснабжения. Источниками воды для охлаждения цикла Карно являются реки и озера.

Объем используемой воды преимущественно зависит от характеристик системы, применяемой для охлаждения-конденсации и отвода тепла. Использование воды в качестве охладителя в конденсаторе является самым важным видом ее применения, а количество воды, требуемое для этих целей, обычно

находится в пределах $0,032\text{--}044 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МВт}^{-1}$ при условии роста температуры воды на $8 \text{ }^\circ\text{C}$. Основными средствами отведения остаточного тепла являются сухие градирни и непосредственный сброс вод из теплообменника в реки. Применение правил, направленных на уменьшение избыточного нагрева речных вод, обеспечило ограничение прямых сбросов в реки. Мокрые градирни являются самыми крупными потребителями воды, сбрасывающими в реки только конденсированную воду. Сухие градирни рассеивают излишнее тепло станции непосредственно в атмосферу посредством теплообменников, охлаждаемых воздухом, без дополнительного отвода тепла в естественные водоемы и без безвозвратного водопотребления. Поэтому станции, использующие такую систему, требуют большого количества топлива и дополнительных инвестиций.

Если в качестве топлива на станции применяется угольная пыль, то вода также нужна для транспортировки золы. На это требуется $0,00095 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МВт}^{-1}$, а для десульфурации топочных газов — около $0,0000019 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МВт}^{-1}$.

Атомная электростанция, как и любая другая комплексная система, подвергается воздействию многочисленных, не поддающихся прогнозированию проблем, которые могут препятствовать ее нормальной работе, а в экстремальных случаях могут представлять угрозу здоровью и безопасности людей. Вероятность возникновения серьезных ситуаций, несомненно, крайне низка, поскольку строжайшие требования безопасности и меры предосторожности учитываются при проектировании атомных электростанций (IAEA, 1981). ВМО (1981 г.) характеризует различные типы атомных электростанций и анализирует проблемы, связанные с гидрологией и водными ресурсами, которые следует рассматривать при планировании, проектировании, эксплуатации и остановке атомных электростанций.

В данной публикации содержатся несколько примеров технологий, используемых для решения важных вопросов различного уровня сложности. Как высокий, так и низкий сток имеют существенное значение для управления и безопасности на атомных электростанциях. Чрезвычайно важно, чтобы аварийное охлаждение активной зоны реактора, охлаждение использованного топлива и окончательное теплопоглощение имели надежное водообеспечение. Защита от наводнений также очень важна независимо от типа электростанции, поскольку они способны нарушить нормальное функционирование электростанции, особенно если это касается повреждения двух или нескольких систем, и таким образом снизить успешность действия систем безопасности в экстремальных ситуациях. В этой связи, как правило, необходимо применять, возможно, более точную систему гидрологического прогнозирования

для верхнего бьефа водохранилища гидроузла и осуществлять периодические проверки гидрологического анализа и допущений, сделанных на стадии проектирования станции.

В большинстве проектов, связанных с выработкой электроэнергии, вопросы качества воды не лимитируют возможности осуществления проекта, но они могут оказывать влияние на габаритные размеры сооружения, характер эксплуатации, выбор места расположения и прочие факторы. Состав подземных вод из различных источников существенно изменяется с точки зрения количества растворенных в них солей и газов. Поверхностные воды обычно содержат взвешенные наносы и часто растворенные или взвешенные органические вещества, поступающие при гниении растений или из сточных вод. Широкое использование синтетических моющих средств, часть из которых невозможно с легкостью разложить в процессе очистки сточных вод, приводит к попаданию измеримых количеств этих химикатов даже в резервуары с водами, используемыми для питьевого водоснабжения.

В промышленных зонах дождевые воды имеют низкий уровень pH и могут потенциально вызывать коррозию из-за содержащихся в них частиц угольной пыли и нефти. Переносимые ветром, они могут оказывать существенное влияние даже на значительном удалении от источников выбросов. Большая часть вод, однако, может быть очищена для дальнейшего использования в конденсаторах охлаждения, при транспортировке золы и десульфурации топочных газов. Тем не менее, для производства пара требуется исключительно чистая вода, не содержащая никаких следов растворенных солей. Затраты на подготовку такой воды обычно зависят от общего содержания растворенных в природной воде солей.

В значительной степени радиоактивные сточные воды имеют место при производстве электроэнергии на атомных электростанциях из-за таких процессов, как просачивание, продувание, техническое обслуживание и перезагрузка топлива. Циркулирующая в реакторе вода используется как источник тепла, а продукты коррозии, образующиеся в системе, являются первичным источником радиоактивных изотопов в этой воде. Предписано, чтобы вода, используемая для целей охлаждения и как источник пара, была исключительно чистой, так как любые соли или другие примеси в воде могут захватить нейтроны и стать радиоактивными. Другим потенциальным источником радиоактивных изотопов в охлаждающей воде является расщепление продуктов, образованных внутри топливных элементов. Следовательно, количество изотопов, содержащихся в реакторной воде, зависит от скорости коррозии, частоты нарушения покрытия, а также интенсивности удаления изотопов посредством конденсации

и использования очистительных деминерализаторов реактора. Возможное присутствие радиоактивных изотопов в воде требует осторожности при очистке отработанных стоков.

В главной циркуляционной системе требуются большие усилия, чтобы снизить нарастание чрезмерной радиоактивности, вызванной либо радиоактивными примесями, либо продуктами коррозии. Первоначально забранная вода не сбрасывается, но часть ее удаляется, очищается и повторно используется в реакторе. Опасность коррозионного воздействия требует, чтобы кипящая вода содержала очень низкие концентрации кислорода и хлоридов. Это достигается деаэрированием и выпариванием воды, используемой в главной циркуляционной системе, для снижения уровней кислорода и хлоридов до значений соответственно меньших чем 0,003 и 0,3 мг·л⁻¹.

4.5.4.2 Добыча и переработка угля

Очень мало воды используется при открытом либо подземном способе добычи угля. Действительно, применение фильтрующей воды обычно нежелательно, и могут потребоваться значительные усилия и затраты для удаления ее из шахт. Производство продуктов дробления угля требует для их удаления больших объемов воды, но она обычно находится в замкнутой системе.

Шламовый способ добычи угля известен с начала двадцатого века. Шламовый трубопровод может быть экономичным при больших размерах и значительной протяженности, но при последующем отделении дробленного угольного продукта вода, перед сбросом в естественный водоток, должна быть очищена. Средства очистки будут зависеть от качества угля (т. е. от содержания серы, золы и минеральных веществ), предложенного для транспортировки; химических добавок, необходимых для предотвращения коррозии в трубопроводе и сопутствующих установках, а также от химических коагулирующих веществ, используемых при обезвоживании.

Сток с территорий угледобычи содержит большое количество металлов, взвешенных веществ и сульфатов от серного колчедана (пирита) и/или марказита, которые в основном сопутствуют угольным пластам, глинистым сланцам и песчано-каменистым осадкам. При взаимодействии с атмосферой эти минералы образуют серную кислоту и соединения гидроксидов трехвалентного железа. Кислые рудничные воды могут образовываться за счет фильтрации через донные отложения прудов, терриконы отработанной породы и складированный уголь. Эти воды могут обладать высокой кислотностью (pH от 2 до 4) и содержать высокие концентрации алюминия, сульфатов, железа и следы тяжелых металлов.

4.5.4.3 Добыча и переработка урана

При добыче урана открытым или подземным способом требуется небольшое количество воды, главным образом для питьевого водоснабжения. Количество воды, используемой непосредственно при добыче урана, является незначительным, т. к. она применяется в основном при влажном дроблении руды.

При обогащении руды образуются сточные воды и происходят выбросы как радиоактивные, так и нерадиоактивные. Твердые, жидкие и газообразные выбросы в окружающую среду в большей или меньшей степени зависят от процедуры, применяемой для проверки и контроля регулирования сточных вод.

4.5.4.4 Производство нефтяных продуктов

Водоснабжение и доступность водных источников, стоимость воды, сохранение энергии и вопросы окружающей среды — все это имеет отношение к нефтепереработке. Современные способы переработки нефти разработаны с целью снижения водозабора до 2 процентов части водозабора более старых одноконтурных систем и технологий. Предпочтение сейчас отдается воздушному охлаждению, нежели водному, и многократному использованию воды (оборотная система производственного водоснабжения). Степень использования воды зависит от сложности очистки, которая напрямую связана с мощностью нефтеперерабатывающего производства: чем глубже степень перегонки нефти, тем сложнее очистка сточных вод. Удельный водозабор может измеряться в пределах от 0,1 до 3 м³·баррель⁻¹ в зависимости от размера, сложности и используемых для переработки технологических процессов.

Воды, участвующие в процессе добычи нефти и ее переработки, должны быть очищены перед их сбросом в естественные водотоки. Процессы очистки обычно включают использование отстойных баков и отделение нефти от воды. Из-за больших объемов воды, необходимых для осуществления таких процессов, разработка оборотных циркуляционных систем становится насущной необходимостью для новых нефтеперегонных заводов.

4.5.4.5 Производство метанола

КПД установок по производству метанола из древесины или природного газа составляет приблизительно 60 процентов. Таким образом, значительная часть тепла, содержащегося в богатых углеродом естественных природных образованиях, должна быть удалена в процессе преобразования их в метанол. Приблизительно половина всех потерь тепла может быть устранена за счет испарения с охладителей, которые испаряют

приблизительно 3 м³ воды на каждую тонну выработанного метанола. Если используется прямое охлаждение и допускается повышение температуры на 10 °С, тогда 170 м³ воды будут проходить через теплообменник для удаления этого тепла, обусловив потери на испарение в размере 1,5 м³·т⁻¹ продукции. Очевидно, если вода в дефиците или дорого стоит, проектировщик должен выбирать водосберегающий метод для удаления тепла.

4.6 СУДОХОДСТВО И РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО РУСЛА

4.6.1 Применение гидрологии для судоходства

Реки — это характерные ландшафтные образования и часть природной, культурной и экономической среды. Помимо того, что они используются водным транспортом, они очень важны с точки зрения национальной экономики и экологии.

На ранних стадиях судоходства глубина и ширина фарватера рассматривались в качестве его основных параметров. Со временем потребности в увеличении транспортной способности привели к созданию более однородных условий для навигации посредством выправления русел рек или регулирования речного русла, что позволило использовать длинномерные и еще более крупные суда и отказаться от частых и дорогостоящих перевалок груза.

С самого начала развития речной навигации глубина и ширина остаются основополагающими характеристиками водных путей. Существуют различные концепции развития водных путей. Согласно классическому водорегимному подходу, обоснование инженерных мероприятий на равнинных сильно меандрирующих и свободно текущих реках следует давать на основе гидрологических характеристик, а для рек с большими уклонами и также для рек с укрепленными берегами — гидравлических. Количество параметров, которые могут быть приняты во внимание, зависит исключительно от возможностей их электронной обработки. Все больше внимания уделяется в настоящее время отношению дизайн судна-форма, водоизмещение, тип двигательной установки — и структуры и разметки водных путей. Что касается гидрологических характеристик, то должны различаться участки рек с незарегулированным течением, находящиеся в состоянии подпора, или с канализованными участками русла и искусственными каналами. Гидролого-гидравлические параметры и характеристики взаимовлияния судов и водных путей характеризуют и определяют навигационную способность последних.

Некоторые факторы, которые влияют на судоходство, более или менее постоянны во времени и могут быть описаны конкретными параметрами. Другие факторы характеризуют временные условия судоходства, которые зависят от режима речного стока, в частности от наступления паводков и меженных периодов. Примером события, имевшего отрицательные последствия, является продолжительный период низкого стока на Рейне в августе 2003 г. (см. рисунок II.4.26). Следующим ключевым фактором является бассейн реки выше по течению: его тип, размер и сток в течение года.



Рисунок II.4.26. Низкий сток на реке Рейн в августе 2003 г. препятствует навигации

Существуют два аспекта речного судоходства, в которых гидрология играет ключевую роль:

- a) определение участков рек, которые могут постоянно использоваться для плавания судов тех или иных типов (например, классификация водных путей в соответствии с рисунком II.4.27);
- b) описание текущих гидрологических условий, которые определяют условия эксплуатации судов, например в соответствии с навигационной глубиной или уровнями воды.

Эти два вопроса подробнее рассматриваются в следующих разделах.

4.6.1.1 Применение гидрологических данных для определения характеристик фарватера

Целью изучения любого фарватера с точки зрения возможностей его использования для судоходства является определение сезонных условий судоходства для различных категорий судов применительно

CLASSIFICATION OF EUROPEAN INLAND WATERWAYS

Type of inland waterway	Class of navigable waterway	Motor vessels and barges					Pushed convoys					Minimum height under bridges 2'	Graphical symbols on maps	
		Type of vessel: General characteristics					Type of convoy: General characteristics							
		Designation	Maximum length	Maximum beam	Draught 3'	Tonnage	Length	Beam	Draught 3'	Tonnage				
	Lim	Lim	Lim	T10	Lim	Lim	Lim	T10	Lim					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
OF REGIONAL IMPORTANCE To West of Elbe	I	Barge	28.5	3.05	1.80-2.20	250-400							4.0	=====
	II	Kanarie-Barge	50-55	6.6	2.50	400-650							4.0-5.0	=====
	III	Canal Keunigt	67-80	8.2	2.50	600-1,000							4.0-5.0	=====
OF REGIONAL IMPORTANCE To East of Elbe	I	Grass Flotow	41	4.7	1.40	300							3.0	=====
	II	804-500	57	7.5-9.0	1.60	500-650							3.0	=====
	III	9'	67-70	8.2-9.0	1.60-2.00	470-700		110-132	8.2-9.0	1.60-2.00	1,000-1,200		4.0	=====
OF INTERNATIONAL IMPORTANCE	IV	Johann Walker	80-85	9.5	2.50	1,000-1,500		85	9.5 3'	2.50-2.80	1,200-1,400		5.25 or 7.00 9'	=====
	Va	Large Rhine vessels	95-100	11.4	2.50-2.80	1,500-2,000		95-100 3'	11.4	2.50-4.50	1,600-2,000		5.25 or 7.00 or 9.10 9'	=====
	Vb							132-185 3'	11.4	2.50-4.50	3,200-4,000		9'	=====
	Vba							95-130 3'	12.8	2.50-4.50	3,200-4,000		7.00 or 9.10 9'	=====
	Vbb	2'	140	15.0	3.90			185-195 3'	12.8	2.50-4.50	4,000-12,000		7.00 or 9.10 9'	=====
	Vbc							270-280 3'	12.8	2.50-4.50	9,000-18,000		9.10 9'	=====
	Vbd							195-200 3'	13.0-14.2 3'	2.50-4.50	9,000-18,000		9.10 9'	=====
VII							285	13.0-14.2 3'	2.50-4.50	14,500-27,000		9.10 9'	=====	

Рисунок II.4.27. Пример классификации водотоков

к отдельным участкам фарватера. Это может быть выполнено посредством использования системы понятий, основанных на качественных характеристиках значений отдельных гидрографических и гидрологических показателей. Такая система понятий была предложена Европейской экономической комиссией ООН. Определения некоторых из этих понятий даны ниже:

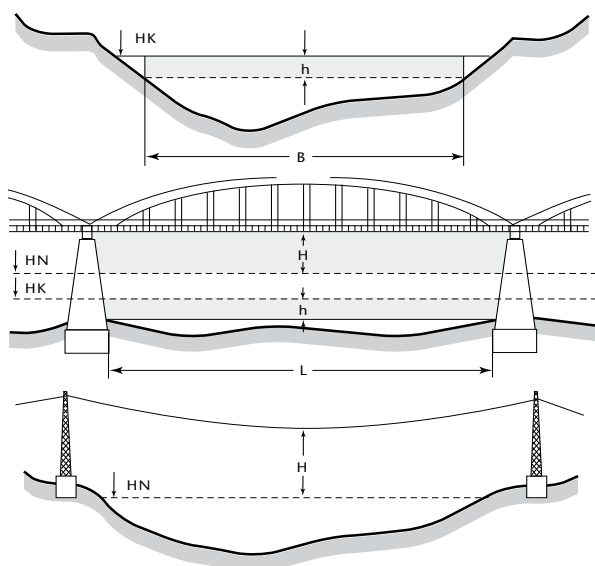
Фарватер — часть реки, пригодная для плавания отдельных судов и их караванов, ограниченная навигационными знаками (бакены).

Судоходный габарит — совокупность факторов, характеризующих глубину, ширину, высоту и извилистость фарватера, требующихся для регулярного и безопасного плавания судов данного водоизмещения (см. рисунок II.4.28).

Минимальная глубина фарватера (h) — минимальная глубина при низком судоходном уровне, которая обеспечивает требуемую ширину фарватера.

Минимальная ширина фарватера (B) — минимальная ширина при низком судоходном уровне, которая обеспечивает требуемую глубину фарватера.

Предписанный вертикальный габарит (H) — минимальное вертикальное расстояние по ширине фарватера между нижним краем любого сооружения (например, моста) и высоким судоходным уровнем.



Примечание. См. определения, раздел 4.6.1.1.

Рисунок II.4.28. Геометрические элементы водотока

Минимальный радиус извилистости (R) — предписанный нижний предел радиуса извилистости речного русла, измеренный по оси фарватера в период низкого судоходного уровня.

Низкий судоходный уровень (НК) — критический для судоходства уровень, обеспечивающий предписанные значения глубины и ширины русла.

Высокий судоходный уровень (HN) — критический для судоходства уровень, обычно обеспечивающий плавание судов заданного водоизмещения.

Навигационный расход — расход воды, требующийся для обеспечения глубины, необходимой для безаварийной навигации.

Минимальный навигационный расход — расход воды, обеспечивающий низкий судоходный уровень в данном поперечном сечении реки.

Максимальный навигационный расход — расход воды, обеспечивающий высокий судоходный уровень в данном поперечном сечении реки.

Навигационный сезон — часть года, в течение которой судоходство не прерывается из-за ледовых явлений.

Брод — участок реки с малой глубиной между двумя берегами, предназначенный для перехода через реку (как используется в данном контексте).

Верхний брод — самый мелкий брод на данном судоходном участке реки.

Способы определения этих параметров рассмотрены ниже.

4.6.1.1.1 Геометрические показатели

Для определения судоходных глубины и ширины абсолютно необходимо иметь данные о сериях поперечных сечений вдоль реки, близко расположенных друг к другу (например, эхолотные измерения). Минимальный уровень, при котором обеспечивается судоходная ширина, должен быть определен для каждого поперечного сечения. Низкий судоходный уровень для каждого поперечного сечения определяется прибавлением значения минимальной судоходной глубины (предписанной для данной реки) к минимальному уровню реки. Радиус извилистости может быть определен графически по контурной карте соответствующего масштаба и точности.

В случае изучения пригодности реки для судоходства целесообразно проводить это исследование для нескольких значений минимальной судоходной ширины,

чтобы пригодность реки для плавания судов определенной категории могла быть точно определена.

4.6.1.1.2 Гидрологические показатели

Для определения фазы гидрологического режима, при котором речной сток обеспечивает низкий судоходный уровень, необходимо произвести расчет гидрографов стока и кривых продолжительности стояния уровней или расходов потока в заданных поперечных сечениях реки.

Гидрографы стока, по возможности, должны быть определены по рядам ежедневных данных минимальной продолжительностью в 30 лет и широкой амплитудой вероятности (см. рисунок II.4.29). Кроме того, гидрографы должны быть рассчитаны для различных вероятностей превышения. Периоды, в течение которых предписанная минимальная глубина фарватера ожидается с заданной вероятностью, могут быть определены путем наложения линии низкого судоходного уровня на эти кривые. Продолжительности этих периодов могут быть получены посредством расчета значений этих продолжительностей и/или вероятностей.

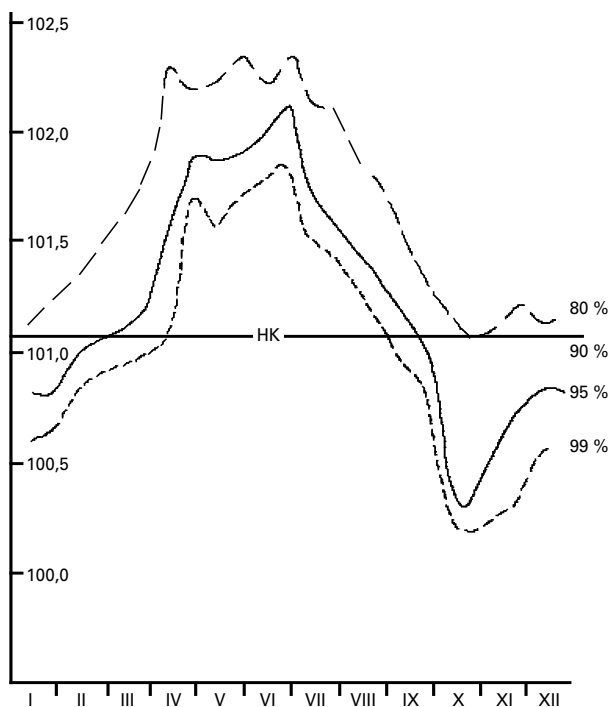


Рисунок II.4.29. Средние гидрографы стока в створе, расположенном на 1 695-м километре реки Дунай

Так как однородность данных об уровнях не всегда гарантируется, то сначала следует определить продолжительности стояния соответствующих расходов воды, а затем пересчитать их в значения для уровней с использованием надежной зависимости уровень-расход (см. том I, глава 5). Продолжительность стояния низкого судоходного уровня может быть определена для заданного участка течения реки посредством сопоставления низкого судоходного уровня с гидрографами стока в различных поперечных сечениях реки. Например, в соответствии с исследованиями, проведенными для реки Дунай, низкий судоходный уровень соответствует уровню воды 94-процентной продолжительности, рассчитанному по рядам уровневых данных за безледоставный период (рисунок II.4.30).

В умеренной и арктической климатических зонах продолжительность навигационного сезона определяется, главным образом, ледовым режимом рек. На основе данных наблюдений за различными ледовыми явлениями, т. е. ледоходом, замерзанием, разрушением льда и ледоставом (том II, глава 6), могут быть рассчитаны значения этих явлений

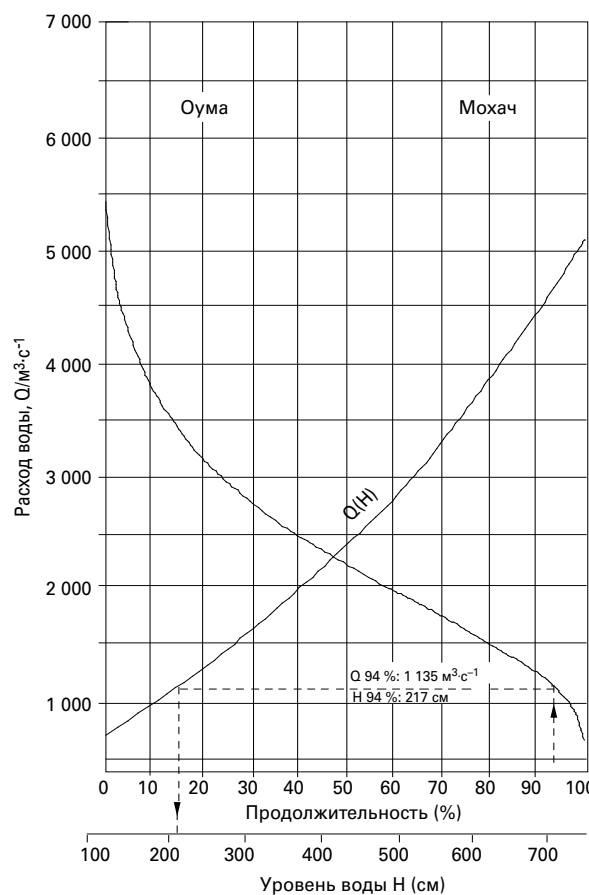


Рисунок II.4.30. Определение судоходного уровня и расхода воды заданной продолжительности

с заданной вероятностью, и может быть оценена продолжительность периода, не пригодного для навигации из-за ледовых явлений. Результаты такого расчета для венгерского участка реки Дунай представлены на рисунке II.4.31.

Для оценки эффективности эксплуатации ледоколов (взламывание, расталкивание, измельчение) необходимо получить и проанализировать многолетние данные о толщине льда. При этом особенно важно определить сроки, когда стоит продолжить или начать взлом льда ледоколами для поддержания фарватера в свободном ото льда состоянии и когда от привлечения ледоколов следует отказаться как экономически неоправданного. Эти сроки существенно зависят от метеорологических условий, определяющих даты появления и разрушения льда.

4.6.1.1.3 Гидравлические параметры

Изучение режима стока, как было отмечено в предшествующем разделе, может быть выполнено только для отдельных относительно устойчивых створов.

Поэтому высокие и низкие навигационные уровни для участков реки между этими створами следует вычислять интерполяцией. Наиболее надежным методом интерполяции, особенно для случаев низкого судоходного уровня, является составление продольных профилей уровня воды. Для этого требуется знание таких гидравлических параметров, как уклоны и шероховатость различных рассматриваемых участков реки (см. раздел 6.3.6).

4.6.1.2 Применение гидрологических данных для обслуживания судоходства

Внутреннее судоходство является сложным видом экономической деятельности, который в значительной мере зависит от природных факторов. Без надежных знаний о состоянии русла реки, речном стоке, ледовом режиме и об их ожидаемых изменениях планирование и осуществление судоходства будет серьезно затруднено. Для того чтобы обеспечить получение такой информации, необходим постоянный сбор данных о гидрологическом режиме, прогнозирование ожидаемых его изменений, а также регулярная передача как самих данных, так и прогнозов потенциальным потребителям. Во многих случаях это осуществляется по-прежнему традиционными способами при поддержке национальных гидрологических служб. Вместе с тем в последнее время системы моделирования и информационное обслуживание становятся все более и более привычными инструментами в повседневной практике и зачастую используются непосредственно самими навигационными службами, например использование электронной информационной системы для судоходства на реке Рейн.

4.6.1.2.1 Сбор данных

Для обеспечения судоходства используются разнообразные данные, собираемые гидрологическими службами. Они включают:

- a) данные, относящиеся к речному бассейну, например сведения о топографии, растительности, землепользовании и осадках. Их получение осуществляется в самом тесном сотрудничестве с национальными метеорологическими службами и региональными плановыми органами;
- b) данные, собранные в створах измерений: уровни, расходы, температура воды, температура воздуха, пробы взвешенных и донных наносов, а также ледовые явления и др.;
- c) физико-географические данные, собранные для участков реки, такие как изменения русла реки, донных структур, перекатов и их глубин; направления потока и его скорости; профили водной поверхности и ледовые явления.

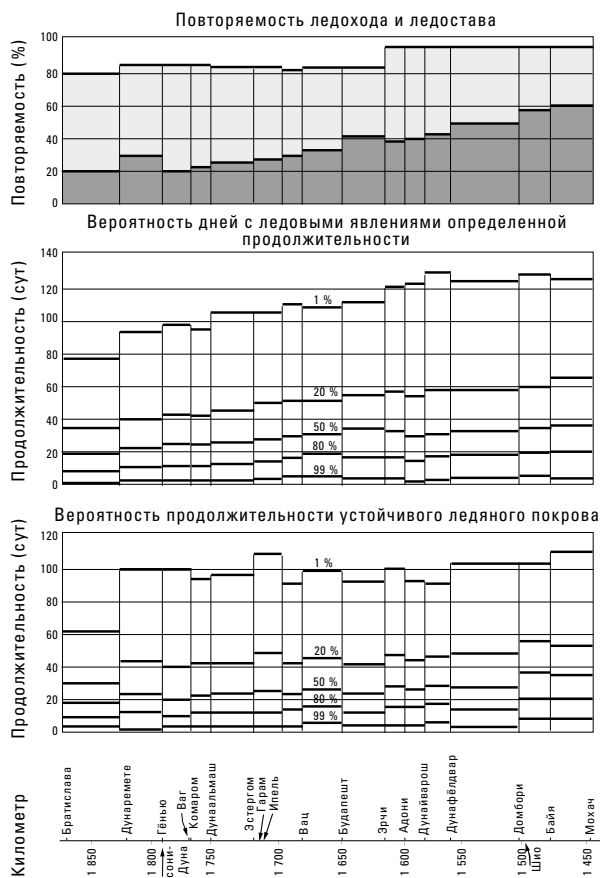


Рисунок II.4.31. Ледовая обстановка на венгерском участке реки Дунай

Для получения большинства данных, необходимых для обеспечения судоходства, применяются стандартные методы наблюдений (см. том I, глава 2), хотя некоторые отличия имеют место, в основном при наблюдениях и измерениях, выполняемых на участках реки между измерительными створами.

Участки рек между изгибами русла реки различных направлений во многих случаях имеют мели, которые определяют наиболее критические точки продольного профиля естественных водоемов. Поэтому промеры глубин этих отмелей должны проводиться многократно всякий раз, когда уровень воды над отмелью не достигнет заданного значения. Глубины следует измерять вдоль гребня отмели. В результате этих измерений определяется ширина фарватера на мелководном участке реки. Протяженность участка реки, на котором глубина воды меньше минимальной навигационной глубины, должна быть точно определена.

Данные о направлении и скорости потока требуются для обеспечения надежного маневрирования караванов барж на опасных участках: отмелях, вблизи водозаборов и сбросов, а также в нижнем и верхнем бьефах шлюзов. Поверхностные скорости течения измеряются с помощью поплавков, в то время как направления и скорости течений на различных глубинах измеряются гидрометрическими вертушками, снабженными указателями направления течения. В современном приборном оборудовании используется принцип акустического профилометра Доплера, позволяющий измерить или рассчитать все необходимые параметры в любой точке поперечного сечения.

Стандартные наблюдения за характеристиками ледового режима, выполняемые вручную вдоль измерительных створов, во многом не удовлетворяют требованиям судоходства и обеспечения безопасности при паводках. Чтобы их удовлетворить, наблюдения должны быть дополнены как с точки зрения количества измерительных створов, так и состава показателей ледового режима, которые должны измеряться. Так, между измерительными станциями стандартной сети через каждые 5–10 километров должны быть оборудованы дополнительные измерительные пункты. Наиболее важной задачей является организация регулярных наблюдений на участках реки, особенно за затоками и зажорами. В периоды дрейфа льда и во время его образования и разрушения наблюдения должны проводиться ежедневно, в то время как в период ледостава и неизменной водности реки наблюдения могут проводиться каждые 5–10 дней. Надежность наземных наблюдений может быть значительно повышена посредством проведения аэросъемок и фотосъемок. Рекомендуются каждые 5–10 дней составлять карты ледовых явлений и распространять их среди уполномоченных органов и пользователей.

Для составления ледовых прогнозы в целях судоходства требуется вести наблюдения за первыми ледовыми образованиями, а затем — за развитием припайного льда. Там, где гидравлические условия способствуют образованию внутриводного льда, его плотность должна определяться в соответствии со следующими тремя градациями: 0–33, 34–67 и 68–100 процентов глубины реки. Плотность дрейфующего льда характеризуется в соответствии со следующими градациями: 0–10, 11–20, ..., 91–100 процентов покрытия поверхности реки.

4.6.1.2.2 *Прогнозирование*

Эффективность и безопасность внутреннего судоходства зависит от надежности гидрологических данных и прогнозов уровней воды при маловодных и многоводных условиях, ледовых явлений и глубин в местах сужения реки и на мелководных участках. Существует потребность как в краткосрочных, так и в долгосрочных прогнозах. Все лица и организации, ответственные за обеспечение судоходства, неподдельно заинтересованы в прогнозах режима стока на судоходных участках течения реки.

Помимо основных видов гидрологических прогнозов (см. главу 7) в судоходстве часто используются месячные прогнозы, составленные с учетом объема как поверхностной, так и подземной воды, содержащейся в речной сети. Так как судоходство особо чувствительно к надежности прогнозов уровня воды в меженные периоды, доверительные границы прогнозов должны быть узкими. Например, для реки Дунай применяются следующие доверительные границы:

<i>Вероятность превышения</i>	<i>Доверительный интервал</i>
60–70 %	50 см
70–80 %	40 см
80–100 %	30 см

4.6.1.2.3 *Передача данных и прогнозов*

Данные, собранные для судоходной реки, и прогнозы, основанные на этих данных, могут быть использованы только в том случае, если они своевременно дойдут до судоходных компаний, капитанов и администраций судоходных путей.

Для того чтобы обеспечить эту своевременность, совершенно необходима хорошо организованная система сбора и передачи информации. Например, в Германии применяется навигационное информационное радио, или NIF. Такая система особенно важна для международных рек, подобных реке Дунай, которая протекает

по территории восьми стран. В соответствии с рекомендациями Дунайской комиссии данные, собираемые в бассейне Дуная, ежедневно передаются по телексовой связи. С целью исключения ошибок для передачи данных были приняты согласованные на международном уровне коды (см. том I, глава 2). Сообщения передаются капитанам частично по радио и частично в виде ежедневных гидрологических бюллетеней.

4.6.1.3 Судоходство на озерах и каналах

Судоходство на озерах и каналах существенно отличается от судоходства на реках:

- a) меньшая значимость информации о физико-географическом и гидрологическом режиме для обеспечения судоходных условий, поскольку эффект регулирования стока обеспечивает стабильность этих показателей;
- b) ледостав на озерах и водохранилищах — более продолжительный и, следовательно, навигационный период — более короткий;
- c) несмотря на то, что проблемы, связанные с наличием мелководных участков, либо малозначимы или полностью устранены, могут возникать другие проблемы локального характера, связанные с процессом заиления головных сооружений шлюзов и портовых сооружений;
- d) увеличивается влияние ветрового воздействия в случае судоходства на озерах и водохранилищах;
- e) существует тесная зависимость судоходства от правил эксплуатации шлюзов и других сооружений.

Для обеспечения безопасности судоходства на озерах и каналах необходимо расширить состав наблюдений:

- a) на берегах озер и речных водохранилищ должны устанавливаться и действовать пункты наблюдений за ветровым режимом и средства предупреждения;
- b) для минимизации заиления техническими средствами требуется на систематической основе определять количества поступающих в водоем наносов и их транзитную часть, необходимые для составления баланса твердого стока;
- c) должны проводиться регулярные наблюдения за внутриводным льдом вблизи барражей, где существуют благоприятные условия для его образования;
- d) автоматические самописцы уровня должны устанавливаться в тех створах, которые являются особенно сложными для судоходства, так например плотины и водопропускные отверстия.

Для наиболее эффективного использования эти данные должны проверяться на достоверность и документироваться, а затем своевременно передаваться пользователям, таким как капитаны судов.

4.6.2 Классификация русловыправительных работ

Русловыправительные работы, регулирование и обслуживание водных путей носят постоянный характер и направлены на облегчение судоходства, защиту берегов рек и населения прибрежной зоны, а также на осуществление контроля за паводками. Реки в естественном состоянии часто меняют свои русла, что приводит к разрушению русла, тем самым препятствуя судоходству. Пропуск льда и паводков представляет собой дифференцированную картину такого случая, тесно связанного с прибрежным землепользованием и пригодностью свободных земель. Русловыправительные работы помогают реке в формировании ее собственного русла с достаточно устойчивыми геометрическими и гидравлическими характеристиками, но они, кроме того, являются причиной многих нежелательных последствий социально-экономического и экологического характера.

В зависимости от поставленной цели русловыправительные работы могут быть классифицированы как многоводные, меженные и средневодные.

Регулирование многоводного русла, также известное как противопаводочное выправление русла, нацелено на скорейшее прохождение максимальных паводочных расходов. Оно часто направлено на обеспечение наиболее удовлетворительных с точки зрения пропуска паводков очертаний и высоты коренного берега, но может включать иные схемы совершенствования русла, направленные на достижение этой же цели. Регулирование землепользования на поймах имеет по существу ту же цель, что и локальное регулирование паводков, а именно снижение паводочных расходов воды без значительных материальных ущербов или потери жизни.

Регулирование меженного русла направлено на обеспечение минимальной судоходной глубины в маловодный период. Это достигается уменьшением ширины русла в межень и, в основном, осуществляется волнорезами. Регулирование меженного русла также известно как регулирование глубины.

Регулирование среднего русла или незначительное регулирование является самым важным. Любая попытка преобразования формы поперечного сечения реки и ее очертания должна выполняться с учетом уровня воды, при котором происходит максимальный транспорт наносов за период год или более. Максимальная активность русловых процессов наблюдается при наивысших уровнях воды, но сохраняются они только непродолжительное время; с другой стороны, при низких уровнях перенос наносов незначителен, но он протекает большую часть времени. Между этими

уровнями существует уровень, стоящий достаточно долго, при котором комплексное воздействие сил, вызывающих движение наносов, максимально. Такой уровень, близкий по значению к среднему уровню, является наиболее важным с точки зрения влияния на конфигурацию реки. Незначительное регулирование русла связано с расходом наносов и поэтому может быть названо регулированием наносов. На основе регулирования среднего русла следует планировать применение двух других видов регулирования русла (Singh, 1989).

Самыми распространенными средствами русловыпрямительных работ являются: струнаправляющие дамбы, волнорезы или выступы и обвязки, спрямление русла, облицовка берегов, растительная защита, габионы и стенки.

Рисунок II.4.32 предлагает схематическое обозрение различных типов связей морфологии речного русла с морфодинамическими процессами, включая граничные условия, которые показывают наиболее значимые факторы и физические процессы.

Краткое описание: Переформирование русла реки под действием потока с учетом геометрии дна, донных грунтов и твердого стока, включая антропогенное воздействие и навигацию

Подобласти:

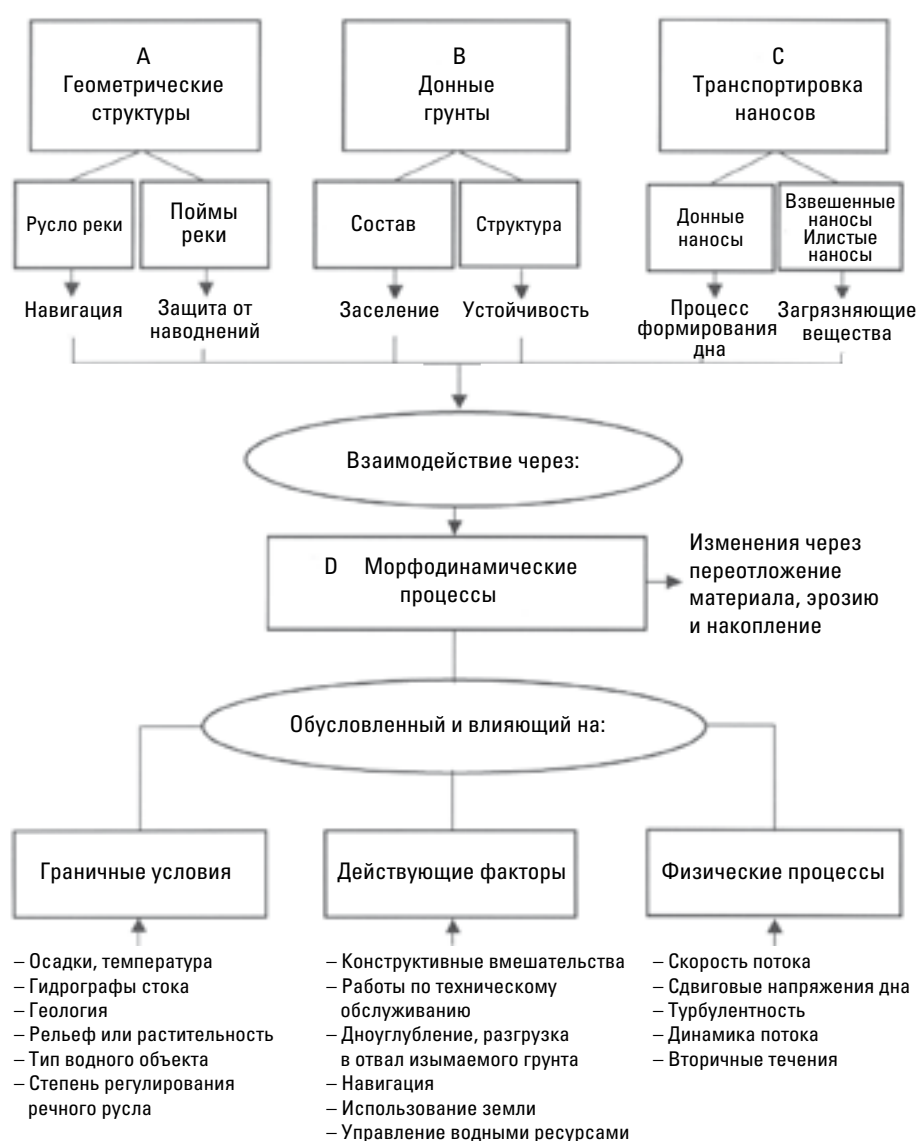


Рисунок II.4.32. Аспекты речной морфологии — общий обзор (Федеральный институт гидрологии Германии)

Наряду с гидрологическими данными большое число других физических, географических, морфологических, метеорологических и гидравлических данных и/или зависимостей требуется для проектирования русловыправительных мероприятий и их успешного проведения. Рамки настоящего Руководства не позволяют привести объяснение в подробном виде многих из этих переменных. Здесь рассматриваются только аспекты, имеющие отношение к гидрологии.

4.6.3 Факторы эрозии, обусловленные русловым потоком

В широком прямом русле, в котором поток может быть представлен в двумерном виде, касательное напряжение на дне потока (τ) выражается следующим уравнением:

$$\tau = \gamma d S, \quad (4.13)$$

где γ — удельный вес воды, d — глубина потока, S — уклон водной поверхности (см. раздел 4.8). Глубина установившегося потока может быть определена по уравнению сопротивления потока, например Коулбрука-Уайта (Colebrook-White) или Маннинга (Manning). Энергия текущей воды и уклон водной поверхности эквивалентны уклону дна. Чаще всего уклон дна определяется по топографическим данным. Таким образом, касательное напряжение на дне потока зависит от глубины потока и уклона русла и достигает максимума при прохождении максимальных расходов.

В прямых руслах определенной ширины особенности потока и распределение относительных скоростей определяется трением о берега и соответственно изменяется граничное касательное напряжение. Максимальное значение касательного напряжения наблюдается не при скоростях, соответствующих максимуму эпюры скорости, а в зонах даунвеллинга у берегов. Максимум касательного напряжения на наклонных берегах обычно равен $0,8 \gamma d S$.

В реках в связи с локальными особенностями в створе потока, такими как пороги и приглубые места, а также его геометрией в плане, наблюдается тенденция к образованию трехмерных структур. Возникающий вторичный поток искажает распределения средней скорости и касательного напряжения. В этом случае уравнение (4.13) дает только приблизительное значение среднего касательного напряжения.

Вторичный поток в меандрирующем русле вызывает пиковые значения касательного напряжения под внешним берегом излучины. Измерения распределения касательного напряжения на изгибах меандра предполагают, что отношение его максимального значения к среднему значению является функцией

отношения ширины канала к кривизне, шероховатости берега и наличию меандрирующих излучин выше по течению (Armann, 1972). Максимальные значения касательного напряжения могут до трех раз превышать его среднее значение выше по течению. Очевидно, высокое локальное касательное напряжение на поворотах меандра вызывает соответствующую эрозию берега и размыв дна.

Любая местная особенность, например мост или плотина, может неблагоприятно повлиять на обычные структуры потока и вызвать местный размыв (Neill, 1973). Возникшие эффекты могут изменить распределение скорости, вызвав трехмерность поля скоростей или увеличение турбулентности. Такая концентрированная эрозионная деятельность сохраняется на некотором участке за препятствием, пока распределение скорости вновь не примет вид, типичный для данного русла.

В целом численное моделирование пограничного касательного напряжения в строго трехмерном потоке пока не возможно; и проведение полевых измерений в таких условиях также не представляется реальным. Однако для исследования особенностей потока и оценки их параметров широко используются физические модели (CIWEM, 1989).

4.6.4 Факторы эрозии, вызванные волнами и судами

Волновая деятельность порождает неустойчивое скоростное поле у берегов, которое может вызвать эрозию при условии сочетания следующих факторов:

- касательные напряжения, вызванные колебательными движениями воды;
- непосредственное воздействие потока на берег;
- фильтрация в берега, как следствие неустойчившихся внешних граничных условий.

Движение воды, вызванное судном, зависит от размеров и геометрических характеристик фарватера, а также от формы, размера, скорости судна и от курса судна. Элементы движения воды могут быть разделены на первичные и вторичные волны и винтовой след. Влияние понижения уровня воды в сочетании с волновым воздействием и обратным течением может привести к серьезной эрозии берегов, особенно если коэффициент объединения высок. При наклонных берегах в качестве него может быть использована характеристика формы профиля берега S при заданном уровне воды (CIWEM, 1989).

В целом эрозионная деятельность винтового следа не сравнима с поверхностными эффектами от движущегося судна, но маневрирование судна или включение двигателя вблизи берегов может вызвать

значительную эрозию. Вызванные работой винта скорости зависят от пропульсивной установки, установленной мощности двигателя и времени воздействия возмущения (Prosser, 1986).

Натурные измерения понижения уровня воды, волн и течений, вызванных проходящим судном, — лучший способ определения критерия защиты берегов. При отсутствии таких данных их значения могут быть оценены с использованием процедур, описанных в литературе (PIANC, 1987). Судно водоизмещением до 40 тонн при прохождении через малые реки и каналы в Соединенном Королевстве может создавать волны высотой до 0,4 метра и вызывать водотоки до $3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (CIWEM, 1989).

4.6.5 Эволюция и характерные черты речных излучин

Естественные водотоки в основном образуют русла, неравномерно изменяющиеся в пределах их долин и пойм русла. Это явление объясняется тем фактором, что каждая река является системой, стремящейся к динамическому равновесию, в которой одним из компонентов, определяющих изменения в системе, — помимо уклона реки, — является процесс формирования речных излучин или меандр.

Было предложено множество теорий для объяснения физических причин меандрирования. Несмотря на имеющиеся различия, большинство из них основано на следующих общих положениях:

- a) одним из компонентов меандрирования является долина, заполненная наносами при их перемещении;
- b) естественные водотоки стремятся достичь или сохранять состояние динамического равновесия;
- c) природа меандрирования, степень развития излучин и частота их появления различаются в зависимости от рек.

Начальная задача русловыправительных работ — найти оптимальное самоуравновешивающееся положение русла, которое свойственно характерным особенностям данной реки. Положение искусственных излучин следует выбирать так, чтобы было возможно достичь нового динамического равновесия речной системы. Для того чтобы это стало возможным, совершенно необходимо изучить естественные излучины в такой степени, чтобы ознакомиться с гидрологическим режимом реки.

Степень извилистости речных излучин может быть охарактеризована самым простым образом как последовательность дуг окружностей (см. рисунок II.4.33). Должны быть определены следующие параметры:

- L — длина дуги, измеренная по центральной линии, между двумя точками перегиба;
- H — длина хорды излучины;
- A — амплитуда излучины;
- R — извилистость или радиус излучины;
- α — центральный угол речной излучины.

В зависимости от фазы развития речная излучина может представлять собой:

- a) правильный участок русла;
- b) неправильную излучину, когда прямая линия, соединяющая две соседние точки перегиба не пересекает выпуклую линию берега, а остается между двумя береговыми линиями;
- c) правильную излучину, которая, в свою очередь, может представлять собой:
 - i) слаборазвитую излучину, если в каждом из двух соседних поперечных сечений русла в точках перегиба есть, по крайней мере, одна точка, из которой видно другое поперечное сечение;
 - ii) развитую излучину, когда $1,2 H < L < 1,4 H$ и $\alpha_i < 120^\circ$.

Характеристики извилистости русла на рисунке II.4.33 могут быть представлены на графике в виде продольного профиля или исследованы как случайные переменные статистическими методами.

Геометрическими характеристиками речного русла в каждом поперечном сечении являются:

- a) площадь поперечного сечения (F);
- b) ширина поперечного сечения (B);
- c) смоченный периметр (P);
- d) гидравлический радиус ($R = F/P$);
- e) средняя глубина ($H = F/B$).

Геометрические характеристики речного русла изменяются как во времени, так и вдоль реки. На основании регулярных русловых съемок геометрические характеристики могут быть исследованы либо как функции уровня воды, либо достаточно часто с помощью различных переменных, рассчитанных для

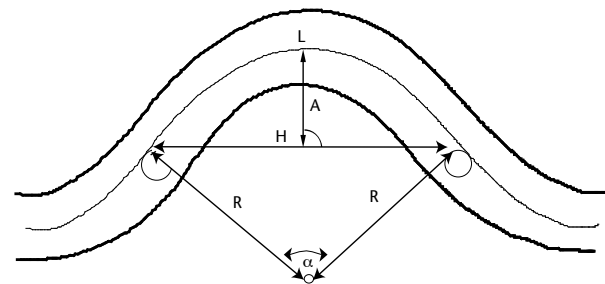


Рисунок II.4.33. Схема определения параметров излучины реки

разных участков реки. На рисунке II.4.34 представлен пример, показывающий изменение ширины поперечного сечения вдоль реки Дунай ниже Будапешта.

4.6.6 Определение расчетных расходов и уровней

4.6.6.1 Определение расчетных расходов для противопаводочного выправления русла

Данные характерного паводка могут быть определены, а паводочные расходы различной обеспеченности рассчитаны при использовании методов, описанных в главе 5. Результаты этих расчетов являются основой, необходимой для выбора расчетного расхода противопаводочного русла.

В текущей практике расчетный расход дается как значение максимального годового расхода за безледоставный период заданной вероятности превышения или заданной продолжительности. Выбор вероятности превышения зависит от демографических и экономических условий территории, которая должна быть защищена от паводков.

4.6.6.2 Определение расчетного расхода для выправления русел среднего размера

Размеры среднего русла тесно связаны с режимом речного стока и стока наносов. Оба этих процесса, а следовательно и процесс эволюции речного русла,

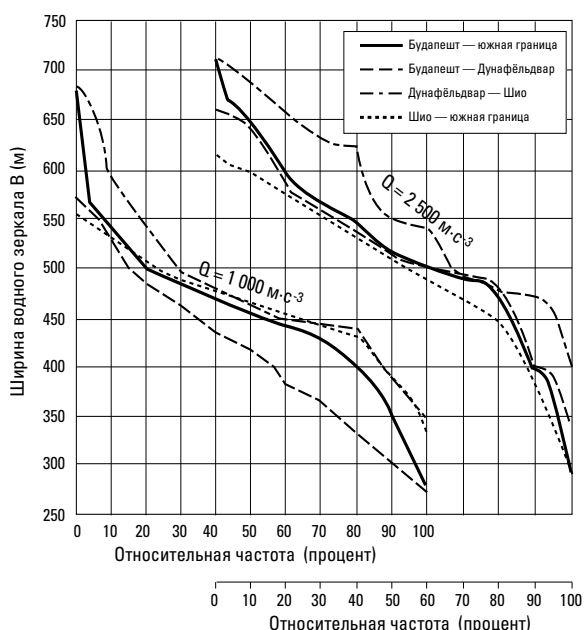


Рисунок II.4.34. Изменчивость поперечного сечения реки Дунай по ширине



Рисунок II.4.35. Система волнорезов на 477-м км реки Эльба. Гравийные насыпи с внутренней стороны не затрудняют навигацию.

меняются во времени. Задача состоит в определении фактического (или расчетного) расхода воды, который приведет к наибольшим изменениям естественных и/или запланированных размеров речного русла. Рисунок II.4.35 показывает поток, отклоненный волнорезом, который должен соответствовать естественному направлению меандрирующей реки.

Каждый из геометрических параметров речного русла меняется различным образом в зависимости от продолжительности стояния различных расходов. Таким образом, если один расход будет определяющим в отношении ширины русла среднего водотока, то другой расход будет определяющим в отношении глубины русла. Для каждого геометрического параметра значение расчетного расхода может быть найдено, исходя из условия наибольшего влияния, которое он оказывает на данный параметр, но не существует единственного руслоформирующего расхода, который бы в равной мере формировал все переменные параметры дна реки и оптимизировал их.

Поскольку режим наносов играет важную роль в формировании речного русла или расчетах, характеристики движения наносов также должны быть рассмотрены. См. раздел 4.8.

Один из способов определения расчетного расхода Q_D в заданном поперечном сечении реки может быть применен либо графически или численно (см. рисунок II.4.36): на вертикальной оси ортогональной системы координат откладываются значения уровней воды $H(m)$, а на горизонтальной оси откладываются значения четырех различных характеристик — частоты состояния уровня $f (m^{-1})$, расхода воды $Q (m^3 \cdot c^{-1})$,

средней скорости течения v ($м \cdot с^{-1}$) и произведения $P = \Delta f Q v$ ($м^4 \cdot с^{-2}$), где Δf является безразмерной (как $\Delta f = \Delta f(H) = [м][м^{-1}]$). В принятой системе координат кривые, представляющие зависимости $Q(H)$, $v(H)$ и $f(H)$, были нанесены первыми.

В то время как кривые зависимостей $Q(H)$ и $v(H)$ являются обычно вогнутыми, как видно из рисунка II.4.36, кривая $f(H)$ является более или менее асимметричной в виде гистограммы или колоколообразной, основой которой является вертикальная ось H , а площадь, заключенная между кривой $f(H)$ и осью H — единичной площадью. Ось H затем разбивается в пределах между минимальным и максимальным зарегистрированными уровнями воды на достаточное число равных интервалов ΔH ($м$). Для среднего уровня H_i в каждом интервале ΔH_i с соответствующих кривых снимаются значения $Q_i = Q(H_i)$ ($м^3 \cdot с^{-1}$), $v_i = v(H_i)$ ($м \cdot с^{-1}$) и $f_i = f(H_i)$ ($м^{-1}$) и рассчитывается произведение $\Delta f_i = \Delta H_i \cdot f_i$. В заключение для каждого уровня H_i рассчитывается произведение $P_i = Q_i \cdot v_i \cdot \Delta f_i$ ($м^4 \cdot с^{-2}$), которое пропорционально кинетической энергии движущейся воды. Расположение результирующего значения P_D , параллельное (по горизонтали) направлению линии P_i , определяется посредством использования графического метода веревочного многоугольника «силы» или численного решения уравнения кинетической энергии. Оба эти метода хорошо известны в статистике. По значению уровня H_D , соответствующего полученному значению «силы» P_D , может быть получено требуемое значение расчетного расхода $Q_D = Q(H_D)$ по кривой $Q(H)$. Результаты, полученные таким образом, должны быть проверены на участках реки, которые считаются устойчивыми.

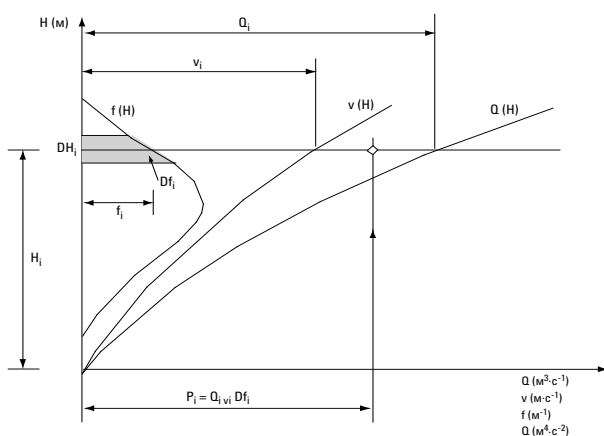


Рисунок II.4.36. Графический метод определения расчетного расхода

4.7 УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ [ГОМС I26, I81, K22, K70]

4.7.1 Общие положения

Управление водными ресурсами на урбанизированных территориях — широкий термин, включающий в себя управление водопользованием, сохранение воды и влияние на водную окружающую среду городских территорий. Урбанизация влияет на водные ресурсы и окружающую среду. Интегрированное управление водным хозяйством урбанизированных территорий — это развитие системы водоснабжения с использованием подходов, объединяющих городское планирование с устойчивым развитием. Как часть городского планирования, интегрированное управление водными ресурсами на урбанизированных территориях признано наиболее подходящим механизмом обеспечения объектов инфраструктуры и городских служб водой и управления городскими загрязненными сточными водами, включая ливневой сток.

4.7.1.1 Источники воды и влияние на них

Проектирование, техническое обслуживание и управление дренажными системами приёма ливневых вод в значительной степени зависит от происхождения вод, которое на урбанизированной территории может быть следующим:

- сток с вышерасположенных территорий;
- сток с прилегающих территорий;
- грунтовый (базисный) сток;
- сток от осадков, выпадающих над рассматриваемой территорией;
- приливы и нагоны;
- сточные воды (коммунально-бытовые, промышленные и т. д.).

Затопления, вызванные стоком воды с сельскохозяйственных территорий, а также высокостоящими подземными водами, рассматриваются в других главах. В главе 4 подробно рассматриваются вопросы проектирования и управления городскими дренажными системами с точки зрения сбора поверхностного стока, обусловленного локальными дождевыми осадками и его взаимодействием с водоприемниками.

Городское и промышленное водоснабжение и управление водным хозяйством связаны с городским дренажем как источники загрязненных (коммунально-бытовых и промышленных) сточных вод. Постоянные наблюдения должны быть установлены за суточными изменениями количества и качества сточных вод от этих источников, так как они служат в качестве входной информации при:

- a) проектировании дренажной системы, ее техническом обслуживании и ремонте;
- b) проектировании и управлении водоочистными сооружениями;
- c) оценке влияния загрязненных и очищенных сточных вод на принимающие их водные объекты.

Мониторинг и управление подземными водами на урбанизированных территориях очень важны из-за разнообразия способов, с помощью которых человек воздействует на их баланс и качество. Подземные воды часто являются основным источником питьевой воды на урбанизированных территориях. Однако пополнение запасов подземных вод на урбанизированных территориях обычно более низкое из-за возрастающей процентной доли непроницаемых для влаги площадей, что обуславливает более низкие скорости инфильтрации и более быстрый поверхностный сток. Кроме того, подземные воды на урбанизированных территориях подвержены загрязнению как от точечных, так и от рассеянных источников.

4.7.1.2 Цели интегрированного управления водным хозяйством на урбанизированных территориях

Цели объединенного управления водным хозяйством урбанизированных территорий следующие:

- a) обеспечение соответствующего количества и качества питьевой и промышленной воды при оптимальных экономических условиях и с минимальным неблагоприятным воздействием на окружающую среду;
- b) минимизация загрязнения и других неблагоприятных воздействий на окружающую среду, включая неблагоприятные изменения уровней подземных вод;
- c) снижение расходов, связанных с затоплением, и ущерба, вызванного ливнями, путем создания соответствующего ливневого дренажа, основанного на сочетании улучшенной дренажной сети и регулирования стока в реальном масштабе времени с помощью вспомогательных сооружений (накопительные и сбросные емкости, насосные станции) и систем оповещения;
- d) снижение неблагоприятных воздействий очищенных и неочищенных городских вод (коммунально-бытовых, промышленных и ливневых) на водоприемники.

Управление городскими дренажными системами в процессе достижения этих целей решает следующие задачи:

- a) определение влияния урбанизации на расход и качество вод бассейна при альтернативных сценариях и различной повторяемости;

- b) проектирование и осуществление контрольных мер и испытаний ливневого дренажа для снижения влияния на окружающую среду;
- c) осуществление этих мер путем рационального регулирования.

4.7.2 Влияние урбанизации

Дренажные бассейны урбанизированных и сельскохозяйственных территорий различны во многом отношениях:

- a) виды землепользования отличаются и обычно более надежно определяются, чем в отношении природных водосборов;
- b) процент непроницаемых для влаги поверхностей выше;
- c) если не применяются специальные методы для снижения стока, паводки образуются быстро с высокими максимумами;
- d) вода дренируется с водосбора посредством сочетания поверхностных коллекторов и подземных дренажных систем;
- e) дренажные бассейны на урбанизированных территориях обычно небольшие, но в больших городских районах они более крупные, со сложными системами заглубленных трубопроводов, насосных станций, а в последние годы и больших подземных хранилищ.

Развитие урбанизации изменяет характер использования земель (см. рисунок II.4.37), резко увеличивая долю водонепроницаемых территорий, таких как

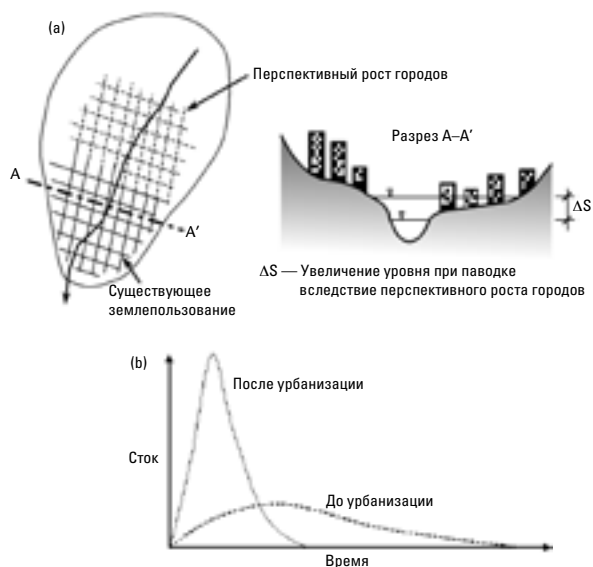


Рисунок II.4.37. Гидрологические последствия землеустройства: (a) изменение характера землепользования вызывает увеличение глубины потока и поперечного сечения и (b) урбанизация вызывает изменение гидрографа.

крыши, улицы и многочисленные парковки. Урбанизация влечет создание искусственных дренажных систем, таких как трубопроводы и каналы, которые преобразуют гидрологический цикл за счет увеличения поверхностного и уменьшения подземного стоков. При этом возрастают как максимальные расходы (рисунок II.4.37 (b)), так и повторяемость паводков. При более высоких скоростях стока с урбанизированных территорий перемещается большое количество твердого стока, наносов и мусора, загрязняющих веществ, что впоследствии ведет к ухудшению характеристик качества водоприемников.

После освоения урбанизированной территории твердый сток, произведенный в бассейне, образуется в основном наносами и твердыми отходами, смываемыми с городских территорий. В этом случае общее количество твердого стока зависит от частоты сбора твердых отходов и частоты уборки улиц, а также и от гидрологических факторов, таких как частота выпадения дождей.

В дождливые дни поверхностный смыв в основном состоит из мусора и прочих поверхностных загрязняющих веществ. В таблице II.4.2 показано изменение некоторых параметров качества воды при различных видах землепользования, зарегистрированное в городах США.

Распространение многих болезней может быть связано с неудовлетворительным управлением водными ресурсами. Во влажных тропиках к болезням и симптомам, обусловленным неудовлетворительностью водоснабжения, санитарии и дренажных систем, относятся диарея, холера, малярия, лихорадка денге и лептоспироз. Условиями окружающей среды, связанными

с дренажом, которые способствуют распространению малярии, являются застойные зоны, обезлесивание, эрозия почв и паводки. Лихорадка денге — болезнь, встречающаяся в теплом климате, которая распространяется москитами, обитающими в чистой застойной воде, которую запасают в домах или рядом с ними (покрышки, вазы и т. д.) в течение сезона дождей. Пруды или местные системы задержания воды в таких климатических условиях должны быть тщательно спроектированы и контролироваться, с тем чтобы не допустить ситуаций, благоприятствующих распространению такого вида инфекционного заболевания.

4.7.3 Проектирование городского ливневого дренажа

Основными конструкционными единицами канализационных систем являются водостоки, трубопроводы, каналы и средства задержания и сохранения стоков. Гидрологическое проектирование этих объектов основывается на вычислении максимального расхода интегрального гидрографа, показывающего пики паводков и объемы. Методы проектирования, как правило, основаны на допущении, учитывающем соотношение осадков и стока. Существуют два основных метода:

- a) рациональный метод, который оценивает только максимальный расход и принимает коэффициент стока и интенсивность выпадения дождевых осадков за какой-либо промежуток времени постоянными. Это предположение вполне обосновано для бассейнов, меньших 2 км²;
- b) метод расчета гидрографа стока, позволяющий определить максимум и объем паводка. Он представляется важным для водохранилищ и учитывает наличие больших урбанизированных бассейнов.

Таблица II.4.2. Осредненные величины средних концентраций по Общенациональной программе стока с урбанизированных территорий, США (Environmental Protection Agency, 1983)

Элемент (мг/л)	Бытовые	Смешанные	Промышленные	Не урбанизированные
Биохимическое потребление кислорода (БПК)	10	7,8	9,3	–
Химическое потребление кислорода (ХПК)	73	65	57	40
Общее содержание взвешенных частиц (TSS)	101	67	69	70
Свинец (Pb)	0,144	0,114	0,104	0,03
Общее содержание меди (Cu)	0,033	0,027	0,029	–
Общее содержание цинка (Zn)	0,135	0,154	0,226	0,195
Общее содержание азота по Кьельдалю (TKN)	1,900	1,29	1,180	0,965
Нитрит (NO ₂) и нитрат (NO ₃)	0,736	0,558	0,572	0,543
Общее содержание фосфора (Tr)	0,383	0,263	0,670	0,121
Растворимый фосфор (Sp)	0,143	0,056	0,080	0,026

Эти методы оценки максимального расхода и объема паводков в значительной мере основываются на данных о расчетном ливне, землепользовании на расположенной выше по течению территории и других характеристиках бассейна.

4.7.3.1 Расчет ливня

Городские территории подвержены воздействию ливней, которые повсеместно имеют стохастическую природу. Поэтому проектирование дренажных систем основано на рассмотрении ливней определенного периода повторяемости. Слой дождевых осадков определенного периода повторяемости обычно определяется по кривым: интенсивность осадков–продолжительность–повторяемость, которые составлены для многих городов (см. раздел 5.7). Выбор периода повторяемости для прогнозирования ливня с последующим использованием его для анализа методом осадки–сток зависит от значения территории, которую требуется защитить, и размера возможного ущерба, к которому может привести наводнение.

Интенсивность выпадения дождевых осадков значительно изменяется от умеренного климата к влажному тропическому. Рисунок II.4.38 демонстрирует дождь продолжительностью один час, зафиксированный 11 приборами во влажном тропическом районе Амазонии, в сравнении со средними дождями, зафиксированными за границей этой области (в субтропиках и умеренной зоне). Для такого же периода повторяемости разница интенсивностей составляет 25 процентов, что может привести к увеличению прогнозируемой величины максимума паводка от 50 до 100 процентов в зависимости от метода расчета.

Управление дренажными системами на урбанизированных территориях в условиях такой высокой

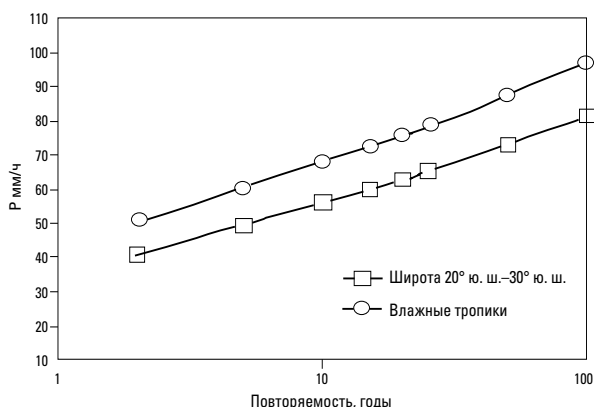


Рисунок II.4.38. Сравнение среднего максимума дождевых осадков одночасовой продолжительности во влажных тропиках и между 20° ю. ш. и 30° ю. ш. в Бразилии (Tusci, 2001)

увлажненности требует использования более коротких периодов повторяемости для проектирования при соответственно более высоком риске наводнения.

4.7.3.2 Развитие бассейна

При моделировании городской дренажной системы должен учитываться размер и уровень развития урбанизированной территории. Кроме того, моделирование потребует на стадии определения диапазона масштабов системы. В основном дренажные системы являются сочетанием главных и второстепенных дренажных сетей. Последние используются для дренажа небольших территорий ($\leq 2 \text{ км}^2$), таких как промышленные зоны или кондоминимумы, тогда как системы первого порядка состоят из больших магистральных дрен и/или главных городских водотоков. Расположенные выше по течению части бассейнов этих главных водотоков могут включать как урбанизированные, так и не урбанизированные территории.

На развитых урбанизированных территориях дренажная система хорошо отлажена, в то время как на неразвитых территориях действует натуральное дренирование. Исследуя будущие сценарии освоения бассейнов неразвитых районов, необходимо получить общий вид дренажной системы из плана развития территории.

В странах, где нет роста городов в связи со стабилизацией уровня населения, как в некоторых европейских городах, сценарии будущей урбанизации связаны с улучшением существующей дренажной системы и качества воды. Вместе с тем в большинстве развивающихся стран урбанизация носит динамичный характер и часто не поддается контролю. Очень сложно управлять потенциальными воздействиями такого развития на сток, с тем чтобы не допустить деградации окружающей среды и возрастания угрозы паводков.

Любой расчет расхода воды на урбанизированной территории должен быть основан на показателях существующей первичной и вторичной систем дренажа и, кроме того, на анализе вероятных или планируемых сценариев развития урбанизированной территории в будущем. Вычисление максимального расхода для небольших дренажных площадей в основном проводится с использованием рационального метода, несмотря на его ограниченность в связи с пространственно–временной изменчивостью гидрологических процессов (Heaney and others, 2002). Выбор подхода для определения основных компонентов дренажной системы будет зависеть от степени развития бассейна.

Неразвитые или развивающиеся территории: бассейн, который на данный момент неразвит или в котором

предстоит возрастание урбанизации, не будет иметь сложной планировки улиц и первичных дренажных систем, но будет иметь план развития, основанный на плотности населения в виде генерального плана развития города. Могут быть получены эмпирические соотношения между плотностью населения и площадью водонепроницаемых территорий для выбора расчетной кривой доли водонепроницаемой территории (AI). Такие соотношения были получены для трех крупнейших городов Бразилии: Сан-Паулу, Куритиба и Порто-Аллегре (Campana and Tucci, 1994), которые привели к следующему уравнению:

$$AI = 0,489 DH, \quad (4.14)$$

где DH — плотность урбанизации, равная числу жителей на гектар территории. Такое соотношение применимо для Бразилии, поскольку $DH < 130$ жителей/гектар. При больших значениях плотности принимается величина водонепроницаемой поверхности 65 процентов. Это соотношение применимо для площадей больше 2 км^2 , а для меньших площадей существует вероятность искажения.

4.7.3.3 Расчет максимального расхода

Расчетный максимальный расход может быть определен следующими методами:

- по частоте повторяемости расхода, определенной по рядам стока репрезентативной длины;
- по эмпирическим уравнениям, полученным в результате регионального анализа расходов паводков;
- по расчетному гидрографу стока, полученному с использованием модели осадки–сток.

При применении метода (а) требуются значения измеренных репрезентативных расходов максимальных паводков. Такие данные не всегда доступны, а получение измеренных характеристик паводков может быть осложнено ввиду продолжающейся урбанизации бассейна. Применение метода (б) требует получения эмпирических уравнений для конкретных регионов, основанных на данных по региону. В целом рекомендуется использовать эти уравнения только для тех районов, для которых они были получены. Использование модели осадки–сток (с) является самым распространенным методом оценки максимального расхода и построения гидрографа дождя при определенном периоде повторяемости. Такой подход рекомендует простые методы для малых бассейнов. Они дают только значение максимального расхода, как и рациональный метод, описанный ниже. В других подходах предприняты попытки определения как максимальных расходов, так и временного хода расходов, производя, таким образом, построение расчетного гидрографа паводка. Более подробно эти методы также описаны ниже.

4.7.3.3.1 Рациональный метод

Для малых бассейнов может быть использован метод, основанный на простом соотношении между количеством осадков и максимальным расходом паводка, известный как рациональный метод. В нем используется следующее линейное уравнение для определения максимального расхода:

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot I \cdot A, \quad (4.15)$$

где Q — расход в $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, C — коэффициент стока; I — интенсивность дождя в мм/ч , A — площадь бассейна в км^2 . Интенсивность дождя выбирается в соответствии с периодом повторяемости T (обычно 2–10 лет во второстепенных дренажных системах) и продолжительностью дождя t . T — зависит от конструкторского решения и характеристик планируемой модели. В рациональном методе t — соответствует времени концентрации стока на бассейне.

Время концентрации (t_c) представляет собой сумму времени инфильтрации воды потока, протекающего по поверхности бассейна, пока он не достигнет водовпуска (t_b), и времени прохождения через трубопроводы и естественные и искусственные каналы (t_r):

$$t_c = t_b + t_r. \quad (4.16)$$

Значение t_b может быть определено по эмпирическим уравнениям, полученным для поверхностного стока. Длина пути стока обычно не превышает 60 м; при больших значениях он задерживается в понижениях рельефа, сточных канавах или в небольших естественных каналах. Она может быть определена как:

$$H \text{ (м)} \quad \leftarrow \quad (4.17)$$

где t_b — в минутах, C_s — коэффициент стока, соответствующий периоду повторяемости 5 лет, L — длина стекания по поверхности в метрах, а S — средний уклон бассейна в процентах (SCS, 1975).

Время движения в естественных и искусственных каналах и трубопроводах может быть вычислено по оценке скорости с помощью уравнению Маннинга:

$$t_r = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{V_i}, \quad (4.18)$$

где X_i и V_i — длина участка i системы и скорость движения по нему, а n — число участков.

Коэффициент стока: этот коэффициент (*C*) представляет собой отношение суммарного слоя поверхностного стока с бассейна к суммарному объему расчетного дождя над ним. Он является функцией, помимо зависимости от прочих факторов, интенсивности дождя, его пространственно-временного распределения, уровня развития урбанизации и характеристик почвы. Вычисление среднего для площади дренирования значения *C* существенным образом упрощено, однако учитывает представление об ее водном балансе и влиянии урбанизации.

При проектировании этот коэффициент вычисляется с помощью представленных в литературе таблиц (ASCE,1992), подобным таблицам II.4.3 и II.4.4. Для периодов повторяемости больше 10 лет коэффициент может быть изменен умножением на *C_f*, представленный в таблице II.4.5.

Коэффициент стока с бассейна может быть вычислен из соотношения между значениями водопроницаемых и водонепроницаемых площадей. Средневзвешенное значение может быть вычислено как:

$$C = C_p + (C_i - C_p)AI, \tag{4.19}$$

где *C_p* — коэффициент для водопроницаемых площадей, а *C_i* — коэффициент для водонепроницаемых площадей; *AI = A_i/A_t* представляет собой соотношение между величиной непроницаемой площади ко всей площади.

Таблица II.4.3. Нормальный диапазон значений коэффициентов стока (ASCE,1992)

Характер поверхности	Коэффициент стока <i>C</i>
Покрытие	
– Асфальт и бетон	0,70–0,95
– Кирпич	0,70–0,85
– Крыши	0,75–0,95
Газоны, песчаная почва	
– Плоская поверхность (2 %)	0,05–0,10
– Средняя (2–7 %)	0,10–0,15
– Крутая (> 7 %)	0,15–0,20
Газоны, тяжелая почва	
– Плоская поверхность (2 %)	0,13–0,17
– Средняя (2–7 %)	0,18–0,22
– Крутая (> 7 %)	0,25–0,35

Примечание. Диапазоны значений *C* характерны для периодов повторяемости 2–10 лет.

Применение этого уравнения к 44 небольшим урбанизированным бассейнам в США позволило получить следующее соотношение (Schueler, 1987):

$$C = 0,05 + 0,9 AI \tag{4.20}$$

с коэффициентом корреляции *R*², равным 0,71. Исползованные гидрологические данные были получены по двухлетнему ряду, и значения коэффициентов могут быть отнесены к периоду повторяемости 2 года (Urbanas and Roesner, 1992). В данном уравнении, если *AI* принять равным 1,0, то *C* составит 0,95, что соответствует коэффициенту водонепроницаемости 0,95 и потерям 5 процентов. Потери могут возникнуть вследствие

Таблица II.4.4. Типичный составной коэффициент стока использования земли (ASCE,1992)

Описание области	Коэффициент стока <i>C</i>
Бизнес	
– Центр города	0,70–0,95
– Окрестность	0,50–0,70
Жилой сектор	
– Отдельные семейные дома	0,30–0,50
– Многоквартирные, отдельно стоящие	0,40–0,60
– Многоквартирные, жилые массивы	0,60–0,75
– Загородные жилые дома	0,25–0,40
– Квартиры	0,50–0,70
Промышленность	
– Легкая	0,50–0,80
– Тяжелая	0,60–0,90
– Парки, кладбища	0,10–0,25
– Места отдыха	0,20–0,35
– Железнодорожные товарные станции	0,20–0,35
– Необработанные	0,10–0,30

Примечание. Диапазоны значений *C* характерны для периодов повторяемости 2–10 лет.

Таблица II.4.5. Поправка коэффициента стока (Wright-MacLaughlin Engineers, 1969)

Период повторяемости в годах	Коэффициент <i>C_f</i>
2–10	1,00
25	1,10
50	1,20
100	1,25

задержания стока в понижениях земной поверхности, испарения с нагретых поверхностей, начальных условий смачивания, инфильтрации, поверхностного перехвата и ошибок исходных данных.

Исследование 11 бассейнов площадью от 3,4 км² до 106 км² с долями водонепроницаемых площадей от 1 до 51 процента в Бразилии (Тусси, 2001) дало следующий результат:

$$C = 0,047 + 0,9 AI \quad (4.21)$$

с R² 0,92. Последнее уравнение имеет коэффициенты, очень близкие к (4.20).

Этот коэффициент различен для разных паводков, зависит от характеристик интенсивности дождя и условий начального увлажнения почвы. В сельскохозяйственном бассейне C_p может сильно изменяться; поэтому важно учесть, что эти уравнения были получены на основе средних значений и отражают только средние условия.

На рисунке II.4.39 представлены коэффициенты стока для большого числа дождей в бассейне реки Дилувио для двух случаев: 1979–1982 гг. с 19,7 процентов водонепроницаемых площадей и 1995–1997 гг. с 40 процентами водонепроницаемых площадей. Этот рисунок демонстрирует существование связи между коэффициентом стока и максимальным расходом паводка: оба возрастают с увеличением интенсивности дождя.

Количественные аспекты оценки стока с городских территорий обсуждаются более подробно в разделе 5.10.

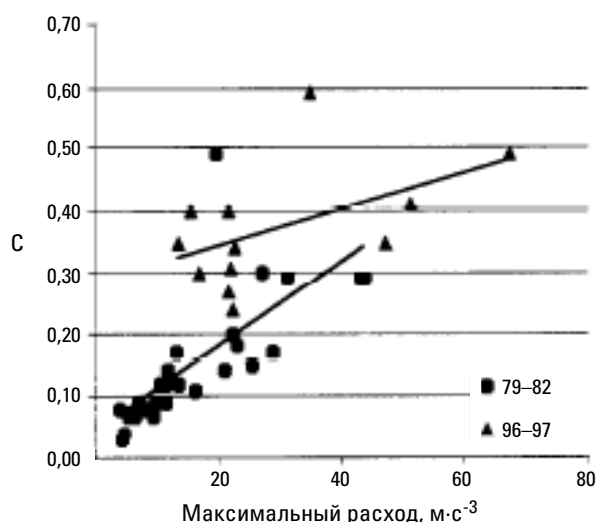


Рисунок II.4.39. Коэффициент стока (C) для двух сценариев: урбанизация 1979–1982 гг. и урбанизация 1995–1997 гг. Излучина реки Дилувио в Порто-Алегри (Santos, 1998)

4.7.3.4 Методы гидрографа: моделирование ливневого стока

Эти методы основаны на моделях осадки–сток, которые рассчитывают гидрограф паводочного стока по данным о дождевых осадках для выбранного периода повторяемости и за определенное время при заданном пространственном распределении. Помимо количества дождевых осадков должны быть известны, кроме того, исходное состояние переменных модели, параметры модели и другие характеристики бассейна. Период повторяемости паводка обычно принимается равным периоду повторяемости дождя. Однако возможно применение подходов, позволяющих стохастически изменять значения других входных параметров, например потери дождевого стока и временных структур.

Такие модели чаще всего содержат два основных модуля: гидрологический модуль и гидравлический модуль. Гидрологический модуль применяется для вычисления суммарного склонового стока за промежуток времени. Гидравлический модуль применяется для пространственно-временного расчета движения этого объема воды по улицам, трубопроводам, каналам и через водоемы.

В гидрологическом модуле применяются следующие инструменты расчета:

- коэффициенты, как и в рациональном методе;
- уравнения инфильтрации, как например уравнения Хортона, Грина и Ампта;
- эмпирические соотношения, подобные установленным Службой охраны почв (СОП) Министерства сельского хозяйства США, в настоящее время известной как Служба охраны природных ресурсов. Первая группа методов предпочтительна, когда модель применяется к интенсивности проявления дождя большей или меньшей той, которая была использована при выработке модели. Вторая и третья группы методов более надежны и используются в таких моделях, как вышеописанная модель СОП (SCS, 1975) и НЕС-1 (Feldman, 1995). Основное упрощение этих моделей состоит в использовании однородного пространственного распределения параметров и дождевых осадков в каждом подбассейне.

Гидравлический модуль может быть представлен следующими типами уравнения:

- уравнения сохранения и перемещения кинематической волны, в которых применены два несложных упрощения: они применяются для потоков со свободной поверхностью в трубах и каналах, но не учитывают обратные связи, которые очень распространены на урбанизированных территориях;
- уравнения диффузии и гидродинамики для потока со свободной поверхностью: такой тип моделей

принимает в расчет обратные связи, но эти уравнения не могут применяться для напорных потоков, возникающих при скорости большей, чем предусмотрено проектными условиями;

- с) уравнения гидродинамики для напорного движения в трубах и со свободной поверхностью. Эта модель в основном используется для оценки сценариев и событий, выходящих за рамки условий проекта.

Эти модели нацелены на отражение различий на водонепроницаемых площадях подбассейна, характеристик поверхностного стока, различий во времени стекания в пределах подбассейна и русловых эффектов в каналах и водотоках. При динамичной урбанизации в течение какого-то времени для оценки влияния изменений плотности урбанизации, соответствующей сценариям развития в будущем, следует использовать модели, учитывающие отношение между водонепроницаемыми площадями и плотностью урбанизации (Tucci, 2001).

Примерами используемых для этой цели моделей являются модели Моуса (DHI, 1990), Hydroworks (HR Wallingford — Wallingford Software) и модель управления ливневым паводком или SWWM (Huber, 1995).

Для оценки параметров модели и уменьшения неопределенности на стадиях планирования и проектирования следует использовать информацию о характеристиках гидрологических факторов и показателях урбанизации. В течение 1970-х и 1980-х годов развивались преимущественно методы и процедуры измерения осадков и стока (Maksimovic and Radojkovic, 1986), что обеспечило развитие и калибровку сложных, часто физически обоснованных моделей анализа дождевых осадков и стока и проектирование систем ливневого дренажа (Yen, 1986). Несмотря на то, что дренажные системы обычно спроектированы для противопаводочной защиты при ливнях заданной вероятности, большинство современных моделей способно моделировать последствия коллекторного стока, объединенного с поверхностным стоком по улицам (сток по открытым каналам). Большое число таких моделей описано в разделе 5.10.5.

Исследования урбанизации в развивающихся странах чаще всего приходится выполнять при отсутствии измеренных гидрологических характеристик, поскольку такие данные либо трудно получить, либо они просто не существуют. Поэтому существует настоятельная необходимость улучшения процесса сбора гидрологических данных на урбанизированных территориях, особенно во влажных тропиках. Без таких данных параметры моделей могут иметь значительную неопределенность, которая способна вызвать удорожание строительства дренажных городских систем

в связи с завышением размера инфраструктуры или затрат, связанных с подтоплениями, вызванными недоучетом размера дренажной сети.

4.7.3.5 Качество воды

Модели оценки качества воды, как правило, имеют модуль количества, позволяющий оценить сток, образованный дождем, и модуль качества для оценки изменения качества воды, выраженной такими параметрами, как биохимическое потребление кислорода, содержание нитратов и фосфатов. Модуль качества воды обычно включает следующие шаги: расчет полной нагрузки загрязнения, переноса, задержания и контроля загрязнения. Некоторые модели имеют компоненты качества воды: SWWM, Моуса и Сторма (HEC, 1977). Основная трудность прогнозирования качества воды — недостаток данных наблюдений для выбора параметров моделей. Следовательно, проверка обычно основывается на сравнении опубликованных данных с какими-либо другими данными. Для лучшего понимания границ влияния и мер контроля, необходимых для принятия решения по управлению городским развитием, используют анализ неопределенности.

4.7.4 Меры контроля городского дренажа

Основными целями городского дренирования являются снижение повторяемости наводнений и улучшение качества воды. Управление городской ливневой канализацией в основном связано с распределением объемов воды во времени и пространстве в пределах городского бассейна с учетом уровня урбанизации, гидравлических сетей и условий окружающей среды (Urbonas and Stahre, 1993).

Ключевыми мерами контроля являются либо меры, связанные со строительством сооружений, либо мероприятия, не связанные со строительством сооружений.

Меры, связанные со строительством сооружений: работы, предназначенные для регулирования воздействия паводков на главную дренажную систему в рамках заданного сценария городского развития. Обычно они заключаются в улучшении состояния каналов и прудов для задержания воды.

Мероприятия, не связанные со строительством сооружений: регулирование землепользования и другие меры регуляторного характера, направленные на снижение угрозы паводков и их предупреждение, включая прогнозирование выпадения дождевых осадков в масштабе реального времени и вероятные последствия предсказанного паводка. Нормативные требования городского дренажа могут применяться для ограничения максимальных паводков в нижнем течении

реки и для уменьшения степени ухудшения качества воды, учитывая социально-экономические условия. Основными моментами этого типа регулирования является сохранение максимальных расходов воды при дальнейшем городском развитии на уровне равном или ниже того, который наблюдался в период до рассматриваемого сценария развития, и установление в каждом случае предельных величин площадей водонепроницаемых территорий. Участие населения является чрезвычайно важным условием эффективного регулирования и должно включать повышение осведомленности населения и образовательные программы.

Первоочередные меры контроля развивающихся территорий были включены в систему нормирования во многих странах (Urbonas and Stahre, 1993). Первоочередной контроль включает обеспечение мер по созданию запасов воды вблизи источника стока, уменьшая необходимость ее транспортировки вниз по течению (Urbonas and Stahre, 1993). Первоочередному контролю подвергаются водонепроницаемые дорожные покрытия и территории парковок, бассейны инфильтрации и канавы.

4.7.5 Управление городским дренажом

4.7.5.1 Принципы

Опыт планирования городских дренажных систем, полученный во многих странах, позволил сформулировать несколько общих принципов управления городским дренажом (Urbonas and Stahre, 1993):

- a) управление должно быть основано на генеральном плане городской дренажной системы для местного органа управления;
- b) участие населения в управлении городским дренажом должно быть расширено;
- c) сценарии регулирования городского дренажа должны учитывать развитие города в будущем;
- d) развитие городской дренажной системы должно основываться на возмещении затрат на капитальные вложения;
- e) оценка противопаводочных мероприятий должна выполняться в масштабе всего бассейна, а не только для характерных участков течения;
- f) противопаводочные мероприятия должны отдавать приоритет первоочередным мерам регулирования паводков, а не переносить воздействие паводка на участки вниз по течению;
- g) больше внимания следует уделять мерам противопаводочного контроля на затопляемых территориях, не связанным со строительством сооружений, таким как зонирование паводков, страхование и прогнозирование паводков в масштабе реального времени;

- h) следует предпринимать шаги для уменьшения последствий стока смыва с городских территорий, а также для решения других проблем качества вод, поступающих в городской дренаж.

Во многих развивающихся странах практика городского дренажа не удовлетворяет этим принципам. Основные причины состоят в следующем:

- a) урбанизация происходит чрезвычайно быстро и непредсказуемо. В общем случае урбанизация начинается с территорий, расположенных в низовьях, и затем продвигается выше по течению, что потенциально увеличивает риск вредного воздействия;
- b) пригородные районы в большинстве случаев развиваются без учета городских норм и правил, либо таких норм и правил просто нет;
- c) пригородные районы и подверженные опасности паводков территории — затопляемые поймы и холмистая местность — заселены семьями с низким доходом и не имеют стационарных объектов инфраструктуры. Спонтанная застройка в районах повышенной опасности, расположенных во влажной тропической зоне, может наблюдаться в следующих городах: на землях, подверженных затоплению — Бангкок, Бомбей, Гуаякиль, Лагос, Монровия, Порт-Моресби и Ресифи; на склонах, подверженных оползням — Каракас, Гватемала Сити, Ла-Пас, Рио-де-Жанейро и Сальвадор де Байя (WHO, 1988);
- d) отсутствие надлежащих систем сбора и переработки мусора приводит к загрязнению воды и засорению дренажных труб. В некоторых африканских государствах городская канализация отсутствует, а при отсутствии стационарной системы дренажа естественные пути дренажных вод часто заполняются мусором и твердыми отложениями (Desbordes and Servat, 1988);
- e) отсутствие институциональной структуры как основы развития городской дренажной системы на муниципальном уровне, в результате чего — отсутствие регулирования, наращивания потенциала и слабое администрирование.

4.7.5.2 Практика управления

Основные требования политики в области управления городскими дренажными системами могут быть обобщены в следующем виде:

- a) управление обеспечивает, чтобы урбанизация не создавала условия для увеличения паводков заданного периода повторяемости в пределах бассейна;
- b) резервируются городские территории для удержания паводковых вод (рисунок II.4.40) или создаются парки в пределах речной долины для аккумуляции объемов паводков, наносов и мусора, а также для улучшения качества воды. В случае невозможности контролировать какие-либо виды воздействия урбанизации в районах выше по течению

реки в связи с недостаточностью нормативно-правовой базы правила дренирования городских территорий могут быть использованы для сведения к минимуму воздействия на участках внизу по течению. Вместо отложения твердых отходов и наносов в трубопроводах или по берегам рек и каналов они могут собираться в определенных местах для очистки, тем самым снижая эксплуатационные затраты. Однако во многих случаях такой подход не является лучшим решением; поэтому в каждом конкретном случае следует учитывать локальные условия. Дальнейшие методические рекомендации по такой форме интегрированного управления земельными и водными ресурсами на городских территориях подготовлены, в частности, Лоуренсом (Lawrence, 2001);

- с) в случае если решением по регулированию паводков в основной дренажной сети является использование ливневых коллекторов или повышение пропускной способности каналов, то необходимо разработать план или проект, с тем чтобы оценить и ограничить влияние ливневых коллекторов или возросшей пропускной способности каналов ниже по течению.

Основываясь на этих принципах, управление городским дренажом должно объединять следующие моменты:

- а) предотвращение: планирование городских территорий с учетом дренирования затопляемых территорий развивающихся городов. Первичный контроль и меры, не связанные со строительством сооружений — вот основные меры, которые следует выбирать на данном этапе планирования;
- б) постоянные институциональные элементы: регулирование второстепенных дренажных систем

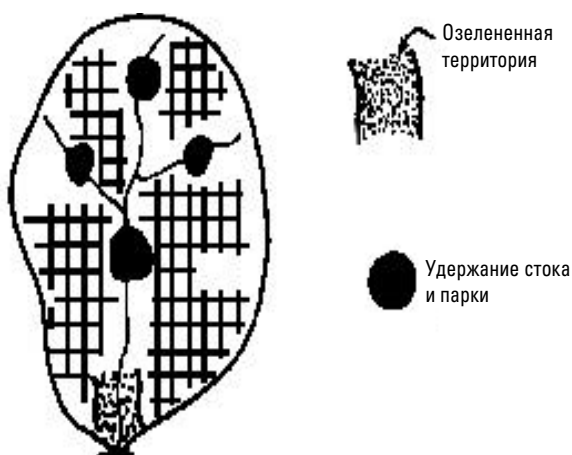


Рисунок II.4.40. Удержание стока с целью регулирования городского дренажа, стадия проектирования (Тусси, 2001)

с учетом увеличения максимального паводка; регулирование землепользования на поймах; использование налоговых стимулов как средства защиты охраняемых территорий и существующих площадей контрольного дренажа; общественные процедуры проверки и совершенствование мер регулирования, соответствующих локальным условиям; повышенный правоохранительный контроль на местном уровне на частично урбанизированной территории;

- с) наращивание потенциала: повышение технического потенциала как местных, так и государственных служащих; создание улучшенных условий труда, с тем чтобы квалифицированные профессиональные работники не теряли работу; выпуск наставления по городскому дренажу; функционирование программ технического образования архитекторов и инженеров; общее образование населения касательно сути рассматриваемых вопросов;
- д) участие населения: использование общественного мнения в рамках кампании по вовлечению широких слоев населения в планирование сооружений городского дренирования с учетом локальных потребностей; консультирование населения представителями негосударственных организаций по вопросам планирования и конструирования городской дренажной системы на всех этапах работ; повышение уровня информированности населения о влиянии урбанизации на городской дренаж;
- е) больше гидрологических данных: недостаток гидрологических и геофизических данных надлежащего качества — хроническая проблема урбанизированных территорий в развивающихся странах, приводящая к созданию проектов, характеризующихся высокой стоимостью или незавершенностью. Программа совершенствования системы сбора данных и разработки методов их применения для получения информации о городском дренаже имеет большое значение для планирования стабильной дренажной системы городской территории;
- ф) контроль воздействия: могут быть разработаны противопаводочные меры, связанные со строительством сооружений на урбанизированной территории, охватывающие последовательно подбассейны, в целях уменьшения влияния урбанизации на количество и качество вод. В процессе планирования для оценки эффективности мер контроля могут быть использованы модели осадки-сток или качества воды. Связанные с эти расходы обычно несет население, проживающее на территории водосборного бассейна, соответственно величине водонепроницаемой площади их земельной собственности.

4.7.6 **Оценочные показатели землепользования, получаемые с использованием методов дистанционного зондирования**

Методы дистанционного зондирования играют важную роль при проектировании дренажных систем, особенно для оценки землепользования. Эта тема рассматривается в томе I, главы 2 и 4.

4.8 **ПЕРЕНОС НАНОСОВ И МОРФОЛОГИЯ РЕЧНЫХ РУСЕЛ** [ГОМС 109, К65]

4.8.1 **Общие положения**

Перенос наносов водным потоком в реках и каналах является важным фактором при планировании, проектировании и эксплуатации водохозяйственных объектов. Перенос наносов влияет на долговечность водохранилищ, устойчивость и перемещение речных русел, проектирование сооружений, которые находятся в контакте с текущей водой, и пригодность воды для различных целей. Правильная оценка влияния переноса наносов и меры, которые могут быть необходимы для его регулирования, требуют изучения процессов размыва, переноса и отложения наносов и их взаимодействия с гидрологическими процессами на соответствующих водосборах.

Этот раздел посвящен процессам эрозии и образования речных наносов и их роли в формировании речных русел, тогда как в разделе 4.10 рассматриваются вопросы гидроэкологии, в которой морфология русел является ключевым фактором.

4.8.2 **Эрозия на речных водосборах**

Основные факторы эрозии — ветер, лед и сила тяжести, но наиболее активным фактором является текущая вода. Процессы, посредством которых вода разрушает почву, сложны и зависят от характера дождей, свойств почвы, уклона склонов, вида растительности, агротехнических приемов обработки почвы и степени урбанизированности территории. Считается, что два последних фактора являются наиболее значимыми среди факторов хозяйственной деятельности с точки зрения их влияния на эрозионные процессы.

Для определения потерь почвы или пластовой эрозии сельскохозяйственных угодий установлены эмпирические уравнения. Одно из них разработано Масгрейвом для условий, преобладающих в США (Chow, 1964). Позднее в него были введены поправки для

более широкого диапазона условий и было получено универсальное уравнение смыва почвы. В дальнейшем в уравнении была учтена эрозия, вызываемая строительными работами. В результате было разработано исправленное универсальное уравнение потерь почвы:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot P \cdot C, \quad (4.22)$$

где A — потери почвы, т/га в год; R — коэффициент размываемости почвы осадками; K — коэффициент размываемости почвы; LS — топографический коэффициент, составной из фактора длины склона L и фактора уклона S ; P — коэффициент противоэрозионных мероприятий, и C — коэффициент, зависящий от характера растительного покрова. Каждый коэффициент может быть рассчитан с помощью карт и таблиц, полученных на основе эмпирических данных для различных местностей и условий.

На лишенных растительности и бесплодных землях овражная эрозия может развиваться с интенсивностью, которая может быть вычислена по эмпирической формуле, содержащей такие параметры как площадь овражного водосбора, приближенный уклон русла, слой осадков и содержание глины в эрозионной почве.

4.8.3 **Русловая эрозия**

Русловая эрозия вызывается воздействием сосредоточенного потока воды на речное русло. Ее масштабы зависят от гидравлических характеристик руслового потока и изначальной подверженности эрозии материалов, из которых сложено русло. В случае несвязных грунтов устойчивость их к эрозии определяется размером, формой и гидравлической крупностью частиц и уклоном русла. Устойчивость к эрозии связных грунтов определяется также степенью связанности грунта. Взаимосвязи между гидравлическими переменными и параметрами, обуславливающими устойчивость русел к эрозии, не полностью изучены и часто выражаются эмпирическими формулами (Chow, 1964; Maidment, 1992). Работы по регулированию стока и выправлению русел могут оказывать существенное локальное влияние на ускорение русловой эрозии, если они вызывают увеличение глубины русла, скорости течения, изменение направления потока или снижение естественной нагрузки потока наносами. Последний фактор часто проявляется на участке реки ниже плотины, и его воздействие может распространяться на многие километры вниз по течению. Методики измерения и вычисления донных отложений, расхода взвешенных наносов и аккумуляции наносов рассмотрены в томе I, раздел 5.5.

4.8.4 Речные системы

Реки образуются в более или менее определенных руслах, дренирующих почвенно-грунтовую воду, которая образуется в результате выпадения атмосферных осадков и таяния снега на возвышенностях. Реки формируются на протяжении столетий. Вместе с водой они переносят твердые частицы, которые вымываются с поверхности речного бассейна, со дна и берегов русел. Речные системы и речные процессы сложны. Например, для участка реки в верхнем створе рассматриваются расход воды и расход наносов, при этом начальные характеристики: глубина, ширина и скорость течения реки, расход наносов на участке, скорость осаждения и объем воды, который может быть со знаком «плюс» или «минус» на рассматриваемом участке. Шероховатость ложа и силы трения могут рассматриваться как второстепенные факторы; их значения связаны с глубиной и скоростью течения, скоростью транспортировки наносов и, в некоторой степени, с интенсивностью водной эрозии и отложения наносов.

За геологическое время река развивается таким образом, что может со временем переносить наносы, поступающие в нее с поверхностным стоком. Большую часть природных русел можно считать существующими в условиях режима течения, при котором основные размеры русел остаются в основном постоянными на протяжении длительного периода времени. Водный режим не препятствует плановым деформациям русла вследствие эрозии и переформированию берегов, но необходим баланс между этими факторами. Нужно, чтобы количество наносов, переносимых через участок реки, было равным количеству наносов, поступающих на следующий участок. Однако это не означает, что существует неизменное соотношение между расходом наносов и расходом воды. Для большинства потоков с подвижным руслом имеется диапазон значений расхода воды, в пределах которого поток может приспосабливаться к десятикратному изменению расхода наносов за счет изменения русловых форм — гряд и дюн. Одновременное изменение глубины и скорости течения реки без каких-либо существенных изменений уклона, ширины русла или вертикального профиля дна. Поток может изменять размеры русла на отдельных участках, во времени и пространстве, не изменяя водный режим, пока эти изменения колеблются вокруг состояния равновесия. Фактически именно таким образом река приспосабливается к изменениям ниже по течению от места слияния с притоком, который имеет другие характеристики процесса транспортировки наносов.

4.8.4.1 Намывание и размывание русел

На определенных участках некоторых водотоков, где количество поступающих наносов превышает

количество, которое поток может транспортировать, их излишек может оседать. Ложе потока таким образом может намываться. И наоборот, если количество наносов, поступающее на участок водотока, меньше, чем транспортирующая способность потока, его дно и берега размываются; поток будет вымывать их, чтобы ликвидировать дефицит наносов. Основные размеры русел, подверженных намыванию и размыванию, остаются постоянными, пока существует равновесие между приходом наносов и их расходом.

4.8.4.2 Типы речных русел

Существует три основных типа речных русел: прямые, разветвленные и меандрирующие. Это разделение характеризует плановые очертания русел. Поток принимает ту или иную форму в зависимости от многих факторов, и их взаимосвязи до сих пор изучены не полностью.

4.8.4.3 Прямые русла

Прямые русла — это те русла, которые имеют прямые границы. Они преимущественно формируются, когда уклон русла реки совпадает с уклоном долины или когда крутые уклоны вызывают относительно высокие скорости течения. В последнем случае вполне возможно, что прямые очертания русла являются результатом инерции, которая препятствует повороту потока.

4.8.4.4 Разветвленные русла

Отличительная особенность ветвления — многорукавность. При этом существует два типа многорукавности. Первый — в межень поток разделяется островами, образуя подобие «косички». В многоводные фазы острова могут затапливаться, и поток течет по всей ширине русла (рисунок II.4.41a). Другой тип многорукавности наблюдается в дельтах рек или в конусах выноса (рисунок II.4.41b). Это в основном намывные русла, разветвляющиеся на разрозненные русла, которые под конец исчезают, соединяясь с прибрежной частью.

4.8.4.5 Меандрирующие русла

Меандрирующие русла характеризуются чередованием изгибов русла или излучин. Этот тип русел имеет тенденцию постоянно смещаться под действием эрозии на отдельных участках и в результате переформирования берегов. Самые большие проблемы при управлении потоками возникают в случае меандрирующих русел, т. к. у них часто наблюдается береговая эрозия. Поскольку решение этих проблем зависит от знания русловых характеристик, многие авторы изучают меандрирующие реки и посвящают им многочисленные работы.

Основная форма меандра по существу синусоидальная кривая (рисунок II.4.42a). Это подвижная форма, постоянно меняющая свое положение вследствие размывания вогнутого берега и отложения материала размыва вдоль выпуклого берега. В идеальных условиях система меандров будет сползать вниз по течению вдоль центральной оси (Vanoni, 1975). Основные размерные величины системы меандров — длина, ширина и кривизна — известны еще как извилистость. Эти размерные величины изначально определяются пятью факторами: уклон долины, максимальный расход воды, донные отложения, поперечные циркуляции и степень эродируемости аллювиальных отложений.

Идеальные системы меандров редко встречаются в природе. Отдельные меандры и целые системы естественных меандрирующих потоков подвержены деформации. Обычный меандрирующий поток (рисунок II.4.42b) состоит из многочисленных неправильных изгибов различных размеров и формы и имеет сходство с идеальным меандром только в отношении чередования направленности и непрерывного смещения изгибов.

4.8.5 Режимы течения и русловые формы

Когда среднее сдвигающее усилие на дно аллювиального русла превышает критическое значение для материалов, из которых оно сложено, частицы начинают смещаться, тем самым деформируя изначально гладкое дно. Характер дна и поверхности воды изменяются как характеристики потока и изменений наносов. Типы донной поверхности и поверхности

воды классифицируются в соответствии с их характеристиками и называются режимами течения (Garde and Ranga Raju, 2000). Русловые формы влияют на сопротивление потоку, транспортировку наносов и турбулентность.

4.8.5.1 Образование русловых форм

Волнистость и деформации подвижного дна русел называются русловыми формами. В рамках одного из научных подходов незначительное вихревое движение на изначально ровной поверхности дна в определенных условиях вызывает поток и локальное перемещение донных частиц, приводящее к образованию впадин и гребней. Деформации дна, формируемые таким образом, усиливают вихревое движение, которое, в свою очередь, увеличивает интенсивность размыва во впадинах и оседания частиц на гребнях, что ведет к формированию гряд и дюн. Развитие русловых форм при этом продолжается, пока не достигает стадии, когда факторы, связанные с увеличением русловых форм, не вмешаются и не ограничат дальнейшее их формирование.

Гряды и дюны, таким образом, достигают оптимального размера. Этот режим известен как ламинарный и начинается с началом движения. Гидравлическое сопротивление большое, а интенсивность переноса наносов незначительна. Русловой формой являются либо гряды или дюны, либо их совокупность. Сопротивление потоку обусловлено, главным образом, шероховатостью. Плоское дно, гряды и дюны — русловые формы в данном случае.

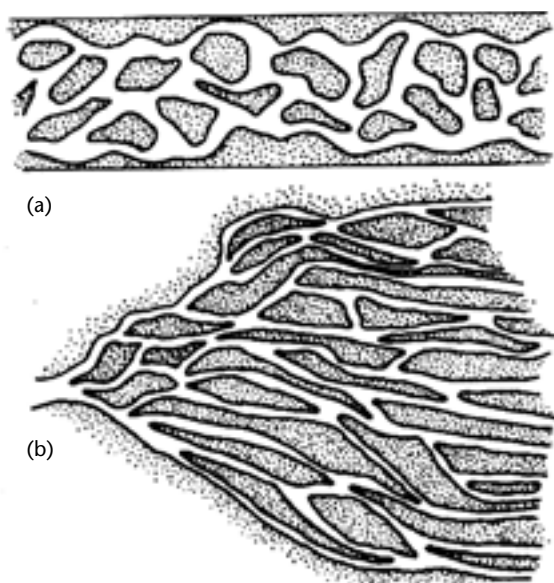


Рисунок II.4.41. Русловая многорукавность (a) и дельтовидное русло (b)

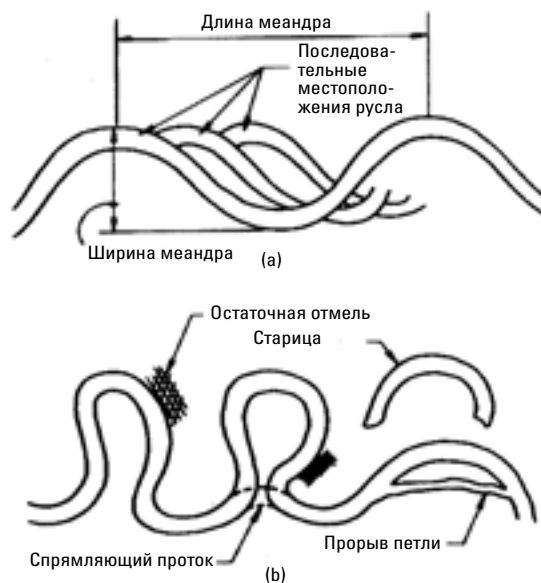


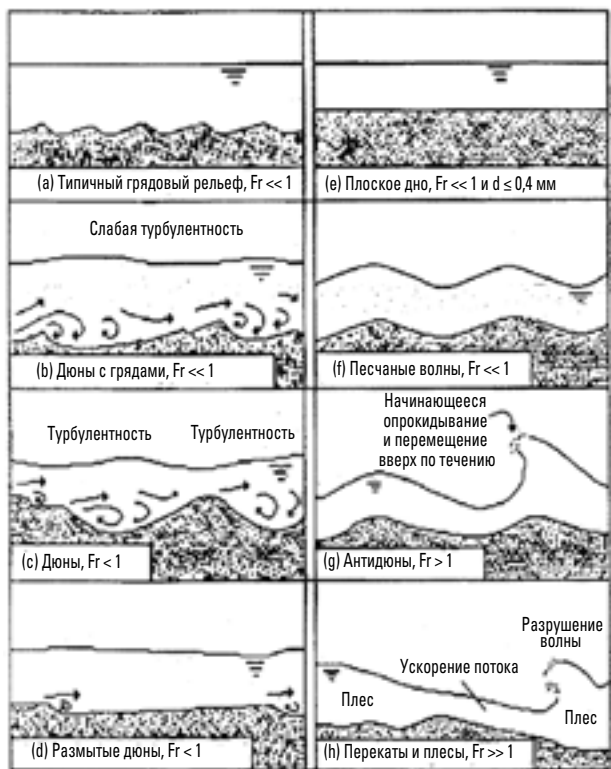
Рисунок II.4.42. Меандрирующее русло (a) и деформирующееся русло (b)

В некоторых других условиях процесс транспортировки наносов осуществляется таким образом, что размер впадин и гребней ограничивается, приводя к формированию плоского дна. Этот режим называется турбулентным. В этом случае гидравлическое сопротивление относительно мало, а интенсивность переноса наносов значительна. Обычные русловые формы — антидюны и плоское дно. Поэтому заранее нужно знать, какой режим преобладает в потоке, для того чтобы знать условия стока.

Переходная область охватывает русловые формы, которые образуются при переходе их ламинарного режима в турбулентный. Этот переход не является уникальным в гидравлике. На рисунке II.4.43 показаны русловые формы, упорядоченные по возрастанию интенсивности транспортировки наносов. Эти процессы описаны ниже (Simons and Richardson, 1961; Van-Rijn, 1984).

4.8.5.2 Плоское дно

Когда среднее напряжение сдвига на дно меньше критического значения для донных отложений, движение донных частиц не происходит. Этот режим называется



FR — Число Фруда

Рисунок II.4.43. Постепенные изменения в форме дна. По материалам Симонса и Ричардсона (1961 г.) с разрешения Американского общества инженеров гражданского строительства

«плоское дно без движения частиц донных отложений», и в этом случае могут применяться закономерности движения открытого потока в устойчивом русле.

4.8.5.3 Гряды

Когда течение усиливается и вследствие этого увеличивается напряжение сдвига на дно, возникают незначительные трехмерные волнообразные деформации, называемые грядами. Они трехгранные по форме с плоским (низовым) тыловым и крутым (верховым) лобовым откосом. В случае донных гряд частицы движутся в основном по дну в виде донных наносов. Вода остается прозрачной, на поверхности наблюдается зыбь. Гряды движутся медленно по направлению течения.

4.8.5.4 Дюны

Когда расход воды увеличивается, размеры гряд растут, и они превращаются в дюны. Дюны также имеют трехгранную форму, но значительно больше по сравнению с грядами. Поток за каждой дюной разделяется и образует струи и сильную турбулентность. В результате наблюдается значительная потеря энергии и дальнейшее взвешивание донных частиц. Дюны также движутся в направлении течения. Число Фруда намного меньше единицы. Поверхность воды выглядит кипящей. Этот режим известен как «гряды и дюны».

4.8.5.5 Переходный режим

Если расход воды еще увеличивается, растет длина дюн, а высота их уменьшается, и дюны частично размываются. Число Фруда составляет 0,8 или близко к 1. На поверхности воды наблюдаются волны, характерные для стадии частично размывших дюн. Этот режим известен как «переходный» и является, как правило, очень нестабильным.

4.8.5.6 Режим антидюн

Дальнейшее увеличение скорости потока ведет к формированию в русле антидюн. В этом случае наблюдается постоянное волнение водной поверхности, антидюны медленно движутся против течения, даже если движение наносов происходит по течению.

4.8.5.7 Роль русловых форм

Русловые формы являются важными факторами, которые необходимо учитывать при строительстве речных водных путей по нескольким причинам. Гидравлическое сопротивление в основном связано с шероховатостью русла, которое в свою очередь зависит от геометрии русловых образований. Движение крупных песчаных дюн мимо таких конструкций, как

водозаборные колодцы и опоры мостов, может повлиять на их надежность из-за снижения уровня дна в подвалье дюн. Водозаборы и насосные станции могут пострадать при движении мимо них гребня дюны. Колодцы в этом случае могут быть занесены или утянуты большим количеством «плывуна». При измерении расходов воды прохождение больших песчаных дюн может повлиять на глубины, уклоны и скорости течения в створах станций и таким образом уменьшить точность измерений. Когда установлены кривые расходов, крупные перемещающиеся песчаные дюны могут вызвать разброс точек, и для одного и того же значения расхода воды могут быть получены значения уровня воды в широком диапазоне в зависимости от положения гряды относительно станции. Поэтому важно знать, какие русловые образования могут наблюдаться на рассматриваемом участке реки на различных стадиях формирования паводка.

4.8.5.8 Шероховатость стенок русла как следствие русловых образований

Одним из последствий русловых образований является увеличение шероховатости стенок русла. Коэффициент шероховатости (n) в формуле Маннинга (см. таблицу II.4.6) меняется от 0,010 до 0,030 в зависимости от режима движения потока, что означает — при ламинарном режиме потока ($Fr = 0,15-0,37$) величина n будет принимать значения от 0,01 до 0,013. Реки меняют форму своего дна в ходе паводков и соответственно коэффициенты шероховатости. Известно, что потери напора по формуле Дарси–Вейсбаха для гряд и дюн в 4,5–8,7 раз больше, чем для потока в условиях плоского дна с фиксированной шероховатостью песчаных частиц. Если наблюдается переход дюн в промежуточное состояние или к плоскому дну, коэффициент шероховатости может уменьшиться.

Таблица II.4.6. Изменение коэффициента шероховатости n Маннинга при различных русловых формах (Simons and Richardson, 1961), выраженное в $m^{-1/3}\cdot c$

Русловая форма	Режим	Приближительное число Фруда (Fr)	Приближительное значение n
Гряды	Ниже	0,14–0,37	0,018–0,30
Дюны	Ниже	0,28–0,65	0,020–0,040
Промежуточное состояние	Переходный	0,55–0,92	0,014–0,030
Плоский слой	Выше	0,70–0,92	0,010–0,030
Антидюны	Выше	> 1,0	0,010–0,030

Коэффициент шероховатости n является аналогом коэффициента гидравлического трения f в формуле Дарси–Вейсбаха:

$$V = \left(\frac{8g}{f} \right)^{0,5} (R_h S)^{0,5} , \tag{4.23}$$

где V — средняя скорость, g — ускорение свободного падения, R_h — гидравлический радиус, S — уклон русла.

Коэффициент гидравлического трения f и коэффициент шероховатости n связаны следующим отношением:

$$n = \mu \cdot f^{1/2} \cdot R_h^{1/6} , \tag{4.24}$$

где R_h — гидравлический радиус [м] и $\mu = \sqrt{\frac{1}{8g}} \approx 0,113$ (в системе СИ).

Это следует из тождества:

$$\frac{V}{V_*} = \left(\frac{8}{f} \right)^{0,5} = \frac{R_h^{1/6}}{n \sqrt{g}} = \frac{C}{\sqrt{g}} , \tag{4.25}$$

где C — коэффициент Шези, V — скорость течения и $V_* = \sqrt{g \cdot R_h \cdot S}$ — скорость сдвига.

4.8.5.9 Гидравлическое сопротивление

Реки в природе — это по своей природе динамические объекты, и их поведение зависит от таких природных явлений, как землетрясения, оползни или изменения местных климатических условий. Значимость русловых образований при измерениях расходов воды хорошо известна, так как они влияют на аллювиальную шероховатость и, следовательно, на гидравлическое сопротивление. Методы прогнозирования аллювиальной шероховатости описаны в различной литературе (Yalin and Ferreria da Silva, 2001).

4.8.5.10 Прогнозирование русловых образований

Рядом исследователей были предложены критерии для обнаружения различных русловых форм, таких как гряды, дюны, переходные формы, плоское дно и антидюны. Большинство этих критериев получено на основе опытов, проводимых в гидрлотках, и поэтому возникают определенные трудности при попытках применять их к рекам.

Распределение глубин и скоростей течения в реках редко является равномерным, и поэтому формы русловых образований, наблюдаемые на различных участках реки, также будут отличаться. Вследствие трехмерности русловых образований возможна лишь статистическая оценка их характеристик, и для получения представления

об их геометрии, вероятно, потребуется использование функций спектральной плотности. Изменение русловых форм вследствие изменения расхода воды требует времени и всегда происходит с задержкой. Кроме того, тип русловых образований зависит не только от глубины, уклона, размера частиц дна, но также и от количества наносов. В гидрлотке, где количество наносов мало, русловые формы с увеличением скорости течения растут в размерах от гряд до дюн. Но в реке с увеличением расхода воды скорости течения увеличиваются в соответствии с количеством наносов, что ведет к уменьшению размера русловых форм и коэффициента шероховатости. Изменение коэффициента Маннинга n с увеличением расхода воды в гидрлотке несопоставимо с соответствующим изменением в реке. Из-за этих трудностей рекомендуется измерять русловые образования на исследуемом участке реки с помощью эхолотатора и делать повторные измерения на различных стадиях развития паводка.

4.8.6 Перенос наносов в руслах

Когда касательное напряжение на дно превышает критическое значение для данного материала, донные частицы начинают движение. В зависимости от градиции частиц перемещение наносов происходит в виде скольжения по дну без отрыва от него, в виде перескакивания (сальтации) или во взвешенном состоянии. В инженерной гидрологии часто используются такие термины как транспортировка наносов, содержание наносов и твердый сток, причем различаются содержание донных отложений, содержание взвешенных наносов (мутность) и общее содержание наносов. Также используется понятие продукты размыва. Это понятие имеет отношение к речным бассейнам и включает частицы, размеры которых меньше размеров тех частиц, которые можно обнаружить на дне потока. Более детальную информацию о соответствующих формулах и уравнениях, описывающих процесс перемещения наносов, можно найти в *Manual on Sediment Management and Measurement* (Наставление по измерению наносов и управлению русловыми процессами) (WMO-No. 948). Обзор различных методов измерения предлагается в *Manual on Operational Methods for the Measurement of Sediment Transport* (Наставление по оперативным методам измерения стока наносов) (WMO-No. 686).

4.8.6.1 Сток взвешенных наносов

Мелкозернистые, или взвешенные, наносы, переносимые речными потоками, происходят в основном из верхних слоев почвы поверхности водосборов и берегов русел. Однако мелкозернистые наносы могут также попадать в реку со сточными и возвратными водами. Например, в реке Рейн доля таких наносов составляет около одной трети. Значительное количество переносимых потоком наносов осаждаются в поймах

рек (Guy, 1970), особенно выше гидротехнических сооружений. Осаждаемый материал уплотняется, и в нем происходят другие физические и химические изменения, которые могут иногда предотвратить его вторичный размыв. При увеличении площади водосбора, как правило, наблюдается уменьшение среднего количества наносов с единицы площади водосбора. Концентрация взвешенных наносов в потоке может быть описана формулами, например Национального научно-исследовательского совета (National Research Council, 1973), Негева (Negev, 1972) и Бесчта (Beschta, 1987):

$$\log c_s = C \log Q + B, \quad (4.26)$$

где c_s — концентрация, выраженная в массе на единицу объема; Q — расход воды; C — безразмерный коэффициент, и B — функция слоя осадков, предшествующего расхода или некоторых других метеорологических или гидрологических переменных.

Концентрация взвешенных частиц в потоке изменяется по поперечному сечению русла. Она относительно высока в нижней части потока и неравномерно распределена по его ширине, поэтому, чтобы получить ее среднее значение, необходимо взять пробы в различных точках и на нескольких вертикалях. Определение средней концентрации взвешенных наносов требуется для вычисления общего количества наносов в единицу времени при умножении на расход воды. Пик графика зависимости содержания взвешенных наносов от времени обычно не совпадает с пиком на гидрографе. Это отставание, как правило, является результатом особых условий на водосборе, и метода для оценки этой задержки по времени еще не найдено.

4.8.6.2 Перенос донных наносов

Грубодисперсные наносы (донные отложения) движутся вдоль русла реки посредством скольжения, перекачивания и взмучивания и откладываются на дне или вблизи него. Факторами, обуславливающими перенос донных наносов, являются размер и форма частиц и гидравлические свойства потока. Как было описано в разделе 4.8.5, на дне русла реки образуются различные формы, оказывая гидравлическое сопротивление стоку воды, которое изменяется в широких пределах и принимает максимальное значение в случае формирования дюн. Эмпирическая формула для расчета скорости перемещения грубодисперсных наносов, предложенная Дю Бойзом в 1879 г. (Chow, 1964), все еще широко используется во многих моделях. Она имеет следующий вид:

$$q_s = c \frac{\tau_0}{\gamma} \left(\frac{\tau_0}{\gamma} - \frac{\tau_c}{\gamma} \right), \quad (4.27)$$

где q_s — количество переносимых наносов на единицу ширины русла, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$; $\tau_o = \gamma R_h S_e$ — удельная нагрузка на дно, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$; τ_c — эмпирически получаемое минимальное значение τ_o , необходимое для перемещения рассматриваемых донных отложений; γ — удельный вес воды, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; c — коэффициент размерности, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$; S_e — энергия текущей воды и R_h — гидравлический радиус в метрах, который для широких рек может быть заменен средней глубиной потока. Значения коэффициентов для уравнения (4.27) приведены в таблице II.4.7 (Chow, 1964).

Таблица II.4.7. Типичные значения параметров c и τ_c

Классификация	Средний диаметр частиц (мм)	$c(\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1})$	$\tau_c(\text{кг}/\text{м}^2)$
Тонкодисперсный песок	1/8	8 370 000	0,0792
Среднедисперсный песок	1/4	4 990 000	0,0841
Крупнодисперсный песок	1/2	2 990 000	0,1051
Очень крупный песок	1	1 780 000	0,1545
Гравий	2	1 059 000	0,251
Гравий	4	638 000	0,435

Более теоретически обоснованная формула была предложена Мейером–Питером в 1934 г. (Chow, 1964):

$$q_s = \left\{ \frac{(\gamma q)^{2/3} \cdot S_e - A \cdot d}{B} \right\}^{3/2}, \quad (4.28)$$

где q — расход воды на единицу ширины русла, $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$; γ — удельный вес воды, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; S_e — гидравлический уклон; d — репрезентативный размер донных отложений, м; q_s — репрезентативный размер донных отложений, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$; B — безразмерная константа, которая принимает значение $B = 0,40$ для принятой системы единиц; A — размерная константа, которая принимает значение $A = 17,0$ в системе СИ. Если перемещаемые наносы имеют другие размеры, параметр d меняется на d_{35} , который характеризует такой размер частиц, при котором 35 процентов донных наносов (по весу) будут перемещаться. Уравнение (4.28) дает надежные результаты, особенно для русел с песчаным дном.

Вторая версия этой формулы была разработана с учетом влияния дюн (Meyer-Peter and Müller, 1948):

$$q_s = 8\sqrt{(\beta \cdot \tau^* - 0,047)^3 (s-1)g \cdot d^3}, \quad (4.29)$$

где q_s — количество переносимых наносов на единицу ширины русла, $\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$, выраженное в объеме частиц

(без объема полостей); g — ускорение силы тяжести; d — репрезентативный размер донных отложений; τ^* — безразмерное граничное напряжение сдвига, которое выражено как:

$$\tau^* = \frac{R_h \cdot S}{(s-1) \cdot d}, \quad (4.30)$$

где R_h — гидравлический радиус; S — уклон русла и s — коэффициент размерности, задаваемый как $s = \gamma_s/\gamma$, γ_s является удельным весом донных наносов, а γ — удельным весом жидкости. Наконец, коэффициент β — это функция двух чисел Стриклера русла реки и частиц (т. е. после исключения касательной силы трения, вызванной русловыми формами) и выражается уравнением: $\beta = \left(\frac{K_f}{K_{grains}} \right)^{3/2}$.

Число Стриклера K — это то же, что и $1/n$, где n — коэффициент шероховатости из таблицы II.4.6.

4.8.6.3 Формулы для расчета общего содержания наносов

Общее содержание наносов — это суммарное количество донных, взвешенных наносов и продуктов размыва. Однако очень сложно установить связь между продуктами размыва и режимом потока. Продукты размыва отсутствуют при экспериментах, проводимых в гидрлотке; поэтому под общим содержанием наносов обычно понимают количество донных наносов плюс содержание взвешенных наносов.

Уравнения для оценки общего содержания наносов могут быть разбиты на микроскопические и макроскопические. В первом случае расчеты донных наносов и взвешенных наносов производятся отдельно, а потом их количество суммируется. В качестве примера можно назвать метод Эйнштейна (Vanoni, 1975). Макроскопические методы основаны на предпосылке, что поскольку количество донных и взвешенных наносов по существу зависит от одних и тех же параметров потока, нет необходимости рассчитывать их отдельно друг от друга. Вместо этого общая нагрузка потока наносами может быть связана с характеристиками потока и наносов. Здесь в качестве примера можно выделить метод Ингелунда и Хансена (1967), хотя он и довольно простой:

$$q_s = 0,05 \cdot \sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d^3} \cdot \left(\frac{K_f^2 \cdot R_h^{1/3}}{g} \right) \cdot (\tau^*)^{5/2}, \quad (4.31)$$

где q_s — количество переносимых потоком наносов, $\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$, в то время как s, d, g, K_f, R_h и τ^* имеют то же значение, что и в уравнении (4.30).

Другая формула для расчета общего содержания наносов — формула Ван Рейна (Van Rijn, 1984). Преимущество метода Ван Рейна в том, что он позволяет

рассчитывать отдельно количество переносимых донных наносов и количество переносимых взвешенных наносов. Тема взвешенных наносов является очень сложной и поэтому не включена в это издание, а формула для расчета количества транспортируемых донных наносов выглядит следующим образом:

$$q_b = 0,053 \cdot \frac{T^{2,1}}{D_*^{0,3}} \cdot \sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d_{50}^3}, \quad (4.32)$$

где q_b — количество переносимых донных наносов на единицу ширины русла; s — в том же значении, что и в уравнении (4.30); g — ускорение силы тяжести; d_{50} — репрезентативный размер частицы донного материала; T — параметр стадии переноса:

$$T = \frac{(U_*^2 - U_{*cr}^2)}{U_{*cr}^2}. \quad (4.33)$$

$D_* = d_{50} [(s-1)g/\nu^2]^{1/3}$, ν — кинематическая вязкость и U_* — скорость сдвига, получаемая из:

$$U_* = \frac{C_f}{C_{grain}} \sqrt{g \cdot R_h \cdot S}, \quad (4.34)$$

где S — уклон; R_h — гидравлический радиус; C_f и C_{grain} — коэффициенты Шези для русла и частиц соответственно; U_{*cr} — критическая скорость сдвига, которая снимается с графика (см. *Manual on Sediment Management and Measurement* (Наставление по регулированию и измерению наносов) (WMO-No. 948), 3.2).

4.8.6.4 Перенос наносов на крутых склонах и селевые потоки

На крутых склонах могут наблюдаться различные процессы, связанные с переносом наносов. Во время паводка расход воды может увеличиться до такого значения, что вода будет разрушать слабый слой дна потока. В результате начнется перенос потоком донных частиц. Кроме того, наносы могут попадать в поток при обрушении крутых склонов. Таким образом, в потоке может быть достаточно наносов, чтобы перемещать их в количестве, близком к его наносотранспортирующей способности. При очень высокой концентрации наносов их движение происходит в пойменных участках, и поток становится неустойчивым. В передней части волны частицы распределены по глубине более или менее однородно, в то время как в ее тыловой части перемешивание частиц не столь интенсивно. В конце концов, крупные частицы скапливаются в придонном слое (Rickenmann, 1991).

Эрозия может увеличиваться в результате изменений, вызванных землетрясениями или извержениями лавы. Зола, глина, крупный гравий, валуны, деревья, рыхлый скальный грунт и антропогенные материалы переносятся текущей водой в виде различных типов селевых

потоков. Селевые потоки, подобно быстроразвивающимся бурным паводкам, продвигаются очень быстро и формируются в самых разных условиях. Селевой поток имеет консистенцию жидкого бетона и движется со скоростью от $15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ или даже быстрее. Селевые потоки чаще всего наблюдаются в пологих аллювиальных конусах выноса — формах рельефа в виде конусов или вееров, созданных за тысячи и даже миллионы лет осаждения продуктов эрозии в горных районах.

Измерения расходов наносов и селевых потоков в таких случаях затруднены, но исследования в этой области ведутся в Китае, Российской Федерации, США, Франции и Японии, где интенсивной эрозии подвержены большие территории. Особый интерес вызывают селевокаменные, грязекаменные и грязевые потоки. Дополнительную информацию можно получить из работ Thorne and others (1987), Coussot (1997), Zhaohui Wan and Zhaoyin Wang (1994).

4.8.6.5 Перенос наносов в реках с гравийным ложем

В горных реках расход донных наносов составляет относительно большую долю общего расхода. Расчеты расходов наносов на горных реках с гравийным руслом затруднены вследствие проблем, связанных со взятием проб донных отложений и проб грунта в полевых условиях, крайней неоднородностью материала ложа реки и несбалансированным процессом переноса наносов. На основе опытов, проводимых в гидроложке с частицами осадочных образований размером до 29 мм и уклонами до 20 процентов, было получено следующее уравнение для количества донных наносов, транспортируемых потоком (Smart, 1984):

$$\frac{q_{BV}}{[g(s-1)d_a^3]^{1/2}} = 4 \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2} \cdot S^{0,6} \cdot \left(\frac{V}{V_*}\right) \cdot \tau^{*0,5} (\tau^* - \tau_c^*), \quad (4.35)$$

где q_{BV} — объемное содержание наносов в потоке на единицу ширины русла; S — уклон русла; g — ускорение силы тяжести; d_a — среднеарифметический размер; d_{90} и d_{30} — характеристики размера мелкодисперсных донных частиц 90 и 30 процентов соответственно; V — средняя скорость; V_* — касательная составляющая скорости; τ^* — объемное напряжение сдвига (как в уравнении 4.29), и τ_c^* — безразмерное граничное напряжение сдвига, откорректированное с учетом уклона и выраженное уравнением:

$$\tau_c^* = \tau_{0c}^* \cdot \cos \alpha \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi}\right), \quad (4.36)$$

где τ_{oc}^* — критический параметр Шилдса; α — угол уклона при условии, что $S = \tan \alpha$, а φ — угол покоя донного материала. Перенос наносов в реках интересует многих исследователей, публикации которых (Raudkivi, 1998; Yalin, 1992) также могут быть использованы в качестве справочного материала. Опубликованные формулы основаны на эмпирических, полуэмпирических и теоретических уравнениях, проверенных на основе лабораторных данных. Из-за отсутствия надежных данных измерений на реках было использовано очень мало данных полевых наблюдений. Результаты расчетов по этим формулам часто очень отличаются. Сложно сказать, какая формула дает наиболее правдоподобные результаты. Выбор формулы или ряда формул для конкретной речной системы требует проверки с учетом данных наблюдений.

4.8.7 Отложение наносов

Взвешенные наносы отлагаются в соответствии со скоростью их осаждения. Зависимость между размером частиц и скоростью осаждения наносов показана на рисунке II.4.44. Первыми отлагаются грубообломочные наносы, которые затем, взаимодействуя с русловыми формами, могут привести к появлению дополнительных меандр и протоков. Наносы, вносимые в водохранилища, аккумулируются и могут формировать дельты в верхней части водохранилищ. Отложившийся материал позднее может быть принесен

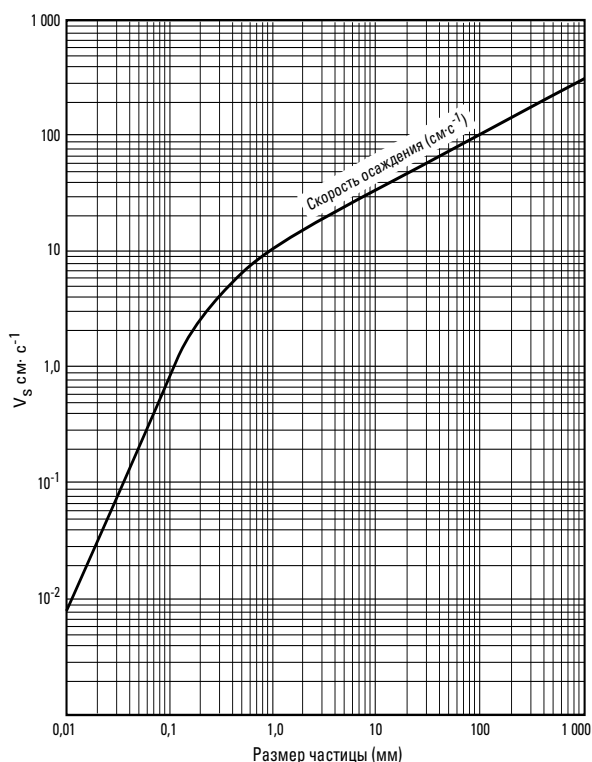


Рисунок II.4.44. Скорость осаждения кварцевых частиц

в более глубоководную часть водохранилища в результате процессов водообмена. Вследствие расширения потока его глубина и скорость уменьшаются; в итоге начинают оседать даже мелкодисперсные наносы. Значительное количество наносов может оставаться во взвешенном состоянии в течение нескольких дней после их поступления в водохранилище. Этот процесс может мешать использованию водохранилища для определенных целей, например для водоснабжения, рекреации и других целей.

Следует подчеркнуть, что не все наносы отлагаются в водохранилищах. Значительное их количество остается в русловой сети верхних частей водосбора, оседает на входе в водохранилище, а также сбрасывается в нижний бьеф. Эффективность заиления водохранилища зависит от гидравлических свойств водохранилища, гидравлических особенностей водовыпусков и характера наносов. Плотность вновь отложившихся наносов относительно мала, но увеличивается с течением времени. Органические компоненты в составе наносов могут подвергаться изменениям, приводящим к уменьшению их объема и развитию биохимических процессов в водной массе водохранилища. Дополнительную информацию см. в разделах 4.9 и 4.10.

4.8.8 Меры по регулированию стока наносов

Меры по регулированию стока наносов подразделяются на две большие категории: меры по преобразованию ландшафтов для защиты водосборов и меры по улучшению структуры речной сети. Детальное описание этих мер содержится в работе Ванони (Vanoni, 1975). Целью мер по преобразованию ландшафтов является снижение эрозии на водосборе и, таким образом, снижение скорости формирования наносов посредством улучшения защиты почв, снижения поверхностного стока и увеличения скорости инфильтрации. Это достигается улучшением защитного слоя почв, сокращением поверхностного стока и уменьшением инфильтрации. Эти меры включают в себя следующее:

- а) землеустройство на основе агротехнических и лесохозяйственных приемов, например использование севооборотов и отказ от выпаса скота на площадях с интенсивным стокообразованием и формированием наносов;
- б) соответствующая обработка почвы, как, например, сельскохозяйственное освоение склонов, развитие террасного земледелия на склонах, расчистка и спрямление естественных водотоков, орошение, а также осушение канав и других понижений рельефа.

Методы по улучшению структуры речной сети направлены на обеспечение защиты от эрозии и проводятся наряду с мероприятиями по преобразованию ландшафтов. Они включают в себя выправление русел

и работы по повышению их устойчивости к размыву, очистку водохранилищ, родников и очагов формирования наносов, улучшение дюкеров и сбросов паводочных вод, а также отвод паводков.

4.9 КАЧЕСТВО ВОДЫ И СОХРАНЕНИЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ [ГОМС K55]

4.9.1 Общие положения

Водохозяйственные проекты должны планироваться и осуществляться без причинения ущерба окружающей среде. Кроме того, они должны реализовываться с соблюдением требований стандартов по качеству воды с тем, чтобы избежать вредного воздействия на водные экосистемы и качество воды. Этим вопросам посвящен данный раздел Руководства. В следующем разделе 4.10 рассматривается более широкий вопрос управления природопользованием на реках в контексте их морфологии и экологии, уделяя особое внимание воздействиям, которые водохозяйственные проекты могут оказывать на речные экосистемы, и методам, которые обычно применяются для предотвращения или смягчения последствий.

Существуют тесные связи между некоторыми количественными характеристиками водных объектов, например водным режимом и разбавляющей способностью вод в реках, или продолжительностью заиления и стратификацией озер, а также их экологическим состоянием и качеством воды. Поскольку в связи с осуществлением водохозяйственных проектов некоторые из этих количественных характеристик часто меняются, то оценка или прогнозирование воздействий на окружающую среду становятся возможными, если такие связи хорошо изучены и определены. К сожалению, такие зависимости могут быть очень сложными и в ряде случаев выражены только в качественном измерении. Кроме того, данные, необходимые для определения их параметров, часто недоступны на практике. По этой причине естественно, что могут быть сделаны только приблизительные оценки качества воды и воздействий водохозяйственных проектов на окружающую среду.

Некоторые действия по защите качества воды и водных экосистем были рекомендованы Организацией Объединенных Наций на Международной конференции по водным ресурсам и окружающей среде: проблемы развития в XXI веке (United Nations, 1992). Рекомендации по разработке и практической реализации экологически безопасных водохозяйственных проектов, а также по смягчению последствий, восстановлению экосистем и модернизации существующих

проектов и ссылки на дополнительные подробные источники можно найти в работах Петса (Petts, 1984), Гора и Петса (Gore and Petts, 1989), а также в публикациях Всемирной комиссии по плотинам (2000). Рекомендации относительно гидроэнергетики и ирригации доступны у Брукса (Brookes, 1988) и Гардинера (Gardiner, 1991), а с рекомендациями относительно проектов по строительству каналов можно ознакомиться у Брукса и Шилдса (Brookes and Shields, 1996). Что касается проектов по управлению речными ресурсами — рекомендации доступны в публикациях Cowx and Welcomme (1998) и WMO/GWP (2006). Томанн и Мюллер (Thomann and Mueller, 1987), Чин (Chin, 2006) предложили обоснованные рекомендации по теме качества воды в реках, озерах и водохранилищах.

4.9.2 Связь между количеством и качеством воды

4.9.2.1 Ручьи и реки

Изменчивость качества речных вод тесно связана с изменчивостью речного стока. Влияние изменений речного стока на содержание в воде различных веществ разносторонне и может проявляться в различных направлениях. Увеличение водности реки обычно ведет к следующим явлениям:

- a) более интенсивное разбавление загрязняющих веществ, поступающих со сточными водами;
- b) увеличение содержания взвешенных твердых частиц, поступающих с поверхностным стоком и за счет взмучивания донных отложений;
- c) высвобождение веществ, абсорбированных или выпавших в осадок, таких как фосфаты и тяжелые металлы;
- d) увеличение биохимического потребления кислорода из-за вымывания раскисляющих веществ из речного русла;
- e) уменьшение доли подземной составляющей речного стока, приводящее обычно к снижению pH;
- f) вымывание и, как следствие, уменьшение бентосных организмов и уменьшение времени восстановления;
- g) ослабление воздействия залповых сбросов загрязняющих веществ;
- h) уменьшение поглощения солнечной радиации и соответственно снижение температуры воды и интенсивности фотосинтеза;
- i) повышение турбулентности и улучшение аэрации и, как следствие, — повышение содержания растворенного кислорода в сочетании с понижением температур.

Последовательность и время наступления высоких расходов являются определяющими факторами в развитии многих из перечисленных выше явлений. Вторая паводочная волна, следуя сразу за первой,

может несколько усилить воздействие первого паводка. Оттепель и осадки после длительного холодного периода могут привести к резкому увеличению притока соленых вод с дорог, покрытых противоналедной смесью, и к резкому повышению содержания натрия и хлора, несмотря на увеличение стока (см. сссылки на эти факторы в разделе 4.7). Вид землепользования, тип почвы, растительный покров и другие характеристики той части водосборного бассейна, в которой формируется паводок, являются еще одной группой факторов, оказывающих значительное влияние на степень изменения качества воды, вызванного паводком.

Если подъем речных вод приводит к значительному затоплению поймы, то появляются дополнительные факторы, оказывающие влияние на качество воды. Наиболее существенные из них — следующие:

- a) ослабление паводка в связи с расширением русла, приводящее к уменьшению стока, и отсюда — к снижению влияния явлений, перечисленных выше в подпунктах (a)–(i);
- b) увеличение соотношения «водная поверхность–объем воды», что создает благоприятные условия для поглощения солнечной радиации, повышения температуры воды и хода фотосинтеза;
- c) снижение скорости течения в пойме, приводящее к уменьшению реаэрации и отложению потенциально загрязненных взвешенных частиц за пределами основного русла;
- d) усиление контакта с ранее аккумулярованными наносами, различными типами почвенных структур, свалками мусора, водоочистными сооружениями, промышленными химикатами и т. д., что ведет к загрязнению реки.

В периоды низкого стока обычно наблюдаются противоположные явления. Кроме того, меженные периоды часто сопровождаются относительно высокой суточной изменчивостью характеристик качества воды, например содержания растворенного кислорода, диоксида углерода, рН и температуры воды. В условиях засушливого климата влияние испарения на концентрацию различных веществ в воде может быть существенным. В холодном климате в зимнюю межень может также отмечаться дефицит кислорода всякий раз, когда ледяной покров препятствует процессу реаэрации.

4.9.2.2 Крупные озера и водохранилища

Термическая стратификация является результатом воздействия естественных факторов. Однако тепловое «загрязнение» и повышенная температура воды вследствие уменьшения притока могут быть обуславливающим или способствующим фактором (см. раздел 4.9.5.4). На рисунке II.4.45 показан типичный профиль температурной стратификации в летний период для крупного водохранилища. Температурная стратификация может

привести к стратификации растворенного кислорода, особенно в богатых биогенными веществами мезо- и эвтрофных озерах и водохранилищах, а также к стратификации других растворенных веществ. Эпилимнион, или верхний слой воды, который летом теплее других слоев, обычно отличается лучшим качеством воды. В нем можно ожидать пониженное содержание силикатов, способствующих росту диатомовых водорослей, более низкие значения жесткости воды за счет выпадения осадков и, самое главное, повышенное содержание растворенного кислорода в результате обмена с атмосферой и фотосинтеза с участием фитопланктона и макрофитов.

В гиполимнионе — нижнем слое воды — вода летом холоднее других слоев и наблюдается пониженное содержание растворенного кислорода. Различные потенциально вредные вещества часто скапливаются в этом слое вследствие их оседания на дне, адсорбции донными отложениями, поглощения живыми организмами, которые, умирая, разлагаются на дне озера (см. раздел 4.9.5.3). Анаэробное разложение водорослей и организмов может происходить и в гиполимнионе. Можно ожидать в гиполимнионе тенденции к увеличению концентрации аммония и сероводорода, уменьшению концентрации нитратов и сульфатов, аккумуляции наносов и иногда тяжелых металлов и периодическому увеличению содержания железа, марганца и фосфатов.

В ходе обмена, вызываемого сезонным охлаждением поверхностного слоя озера, наблюдается конвективная циркуляция как следствие вертикального перемешивания воды озера и гомотермии. В глубоких озерах и водохранилищах с большим объемом гиполимниона этот обмен может привести к гибели рыбы и другим проблемам, т. к. большой объем воды низкого качества смешивается с водой эпилимниона более высокого качества.

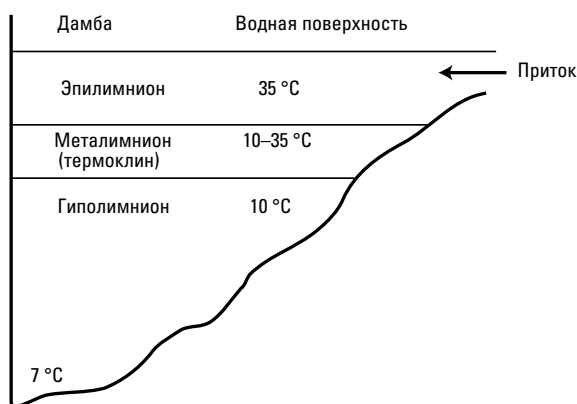


Рисунок II.4.45. Репрезентативный профиль, показывающий летнюю стратификацию в большом водохранилище с высокой дамбой

Кроме перечисленных выше, могут иметь место следующие воздействия:

- a) в крупных озерах и водохранилищах органический материал разлагается в большей степени из-за длительного времени пребывания в этих водных объектах;
- b) различия в качестве воды по этой причине незначительны;
- c) качество воды в реках, вытекающих из водохранилища, сильно зависит от наличия стратификации и глубины расположения впускного отверстия, в то время как реки, вытекающие из естественных, незарегулированных озер выносят из них воду эпилимниона.

4.9.3 Влияние водохозяйственных проектов на качество воды ручьев и рек

4.9.3.1 Дамбы и плотины

Дамбы и в меньшей степени запруды обычно оказывают следующие воздействия на качество воды на вышерасположенных участках рек за счет повышения там уровней воды:

- a) усиление процессов самоочищения из-за увеличения времени пребывания воды на рассматриваемом участке и повышенного отложения взвешенных наносов, что приводит к увеличению поглощения солнечной радиации и к изменениям характеристик донных наносов в речном русле;
- b) повышение температуры воды и развитие фитопланктона, большее потребление кислорода и увеличение внутрисуточных колебаний содержания кислорода, рН и углекислого газа — как результат (a).

Миграция рыбы может быть нарушена как вследствие возникновения физического барьера, так и из-за изменений качества воды. Изменения береговых очертаний или прибрежной растительности, которые происходят под влиянием рельефа, климатических условий и колебаний уровня воды, могут также влиять на качество воды. Например, мутность воды может возрастать в водохранилищах, где наблюдаются колебания уровня воды. В условиях холодного климата плотины и запруды создают благоприятные условия для удлинения периода ледостава на участках верхнего течения реки. Это приводит к уменьшению реаэрации. Прочие воздействия, которым могут быть подвержены большие запасы воды, могут быть следствием температурной стратификации. Повышенное загрязнение водохранилища может привести к эвтрофикации и анаэробным условиям (см. разделы 4.9.5.1 и 4.9.5.2 соответственно).

Влияние дамб и плотин на качество воды на нижних участках реки зависит от продолжительности пребывания воды в водохранилище, для которого оно

рассчитывается как отношение запасов воды к притоку. Оно также зависит от стратификации, конструкции дамбы и режима ее работы, особенно от глубины, на которой расположены водовпускные отверстия по отношению к гипolimниону. Наиболее значимые воздействия дамбы или плотины на качество воды:

- a) уменьшение взвешенных наносов, содержания загрязняющих веществ и мутности;
- b) изменения химического состава воды — часто снижение концентраций растворенного кислорода и нитратов — и повышение содержания фосфатов, углекислого газа и сероводорода; последнего особенно, если в верхнем бьефе преобладают анаэробные условия;
- c) снижение температуры воды летом и повышение ее зимой, что влияет, главным образом, на беспозвоночных и ихтиоценоз на нижних участках бьефа;
- d) уменьшение внутрисуточной амплитуды колебаний температуры воды, к которым должны адаптироваться речная флора и фауна.

4.9.3.2 Работы по регулированию речных русел

Работы по регулированию речных русел обычно включают углубление и спрямление русел для различных целей, включая судоходство, регулирование паводков, улучшение землепользования и защиту от эрозии. Это приводит к изменениям геометрических и гидравлических характеристик речного русла, а в некоторых случаях также и поймы. Дополнительную информацию см. в разделе 4.6.

В случае, когда регулирование речного русла осуществляется в целях судоходства, то эти работы обычно включают возведение навигационных плотин и шлюзов. Помимо того влияния на качество воды, которое оказывают плотины (раздел 4.9.3.1), работы по регулированию русел и эксплуатация судоходных каналов увеличивают мутность и перемешивание воды, а также аэрацию воды за счет механического воздействия движущихся судов. С другой стороны, суда являются источником как постоянных, так и случайных загрязнений, и могут поднимать со дна загрязненные отложения. Дноуглубительные работы на фарватерах также могут вызывать подобные проблемы. В других случаях работы по регулированию речных русел приводят к снижению интенсивности процессов самоочищения, т. к. спрямление берегов уменьшает застойные зоны, в которых происходит самоочищение воды и создаются благоприятные условия для развития животного и растительного мира. Сокращение соотношения площади водной поверхности относительно объема воды приводит к уменьшению поглощения солнечной радиации и реаэрации. Уменьшение реаэрации может быть частично компенсировано в том случае, когда регулирование русла приводит к более высоким скоростям течения воды.

4.9.3.3 Изъятие стока и переброска

Помимо стокорегулирующих воздействий дамб многие водохозяйственные проекты связаны с изъятием стока ниже по течению посредством устройства водозаборов в целях водоснабжения или с переброской воды от источников вне бассейна.

Если забранная из реки вода подвергается обработке, а образующиеся ил и осадок сбрасываются обратно в реку, или когда вода изымается с менее загрязненных участков поперечного сечения реки, то влияние водозаборов на качество воды аналогично уменьшению стока речных вод или сбросу стоков (см. раздел 4.9.5). Сброс ила и осадка является предметом контроля с учетом установленных требований и регулирующей базы по качеству воды водотоков. Они существенно различаются для каждой страны.

Влияние перебросок стока на качество воды зависит, главным образом, от качества перебрасываемых в реку вод. Прибавление стока за счет воды худшего качества равносильно сбросу загрязненных вод, точно так же, как эффект забора воды из чистого водотока.

4.9.4 Влияние водохозяйственных проектов на качество вод крупных озер и водохранилищ

Качество воды крупных озер и водохранилищ может улучшаться или ухудшаться под влиянием водохозяйственных проектов. Там, где такие проекты предполагают изъятие воды лучшего качества, например из эпилимниона, они ведут к ухудшению качества воды в озере или водохранилище. То же самое наблюдается и тогда, когда вода более низкого качества закачивается в озеро или водохранилище. Как изложено в разделе 4.9.2, качество воды, вытекающей из водохранилища, зависит от наличия или отсутствия стратификации и от глубины расположения водовпускных отверстий.

Качество воды крупного водохранилища зависит в большой степени от характеристик подстилающей поверхности перед затоплением и от ее обработки. Если дно будущего водохранилища покрыто почвами с большим содержанием органических соединений или гумуса, то после заполнения водохранилища они вымываются и способствуют эвтрофикации (см. раздел 4.9.5.1). Этого можно избежать, удалив растительность и почвенный покров до наполнения водохранилища, что является достаточно дорогостоящим мероприятием.

4.9.5 Изменение качества воды под влиянием сброса загрязняющих веществ

4.9.5.1 Эвтрофикация

Одной из наиболее распространенных форм загрязнения является чрезмерная концентрация биогенных веществ, содержащих азот и фосфор и поступающих со сточными водами с городских территорий или с поверхностным стоком с сельскохозяйственных территорий. Это обычно приводит к повсеместному развитию различных водорослей, особенно на участках с низкими скоростями течения. Последующее уменьшение содержания растворенного кислорода может привести к значительному сокращению численности или даже исчезновению отдельных видов растений и животных. Этот процесс известен как эвтрофикация. Это естественный природный процесс, который присущ озерам на стадии их «зрелости» и «старости». Однако в естественных условиях без участия человека этот процесс может затягиваться на сотни и тысячи лет в зависимости от размера озера, гидрологических условий, а также почвенного покрова бассейна. Человечество несет ответственность за ускоренную эвтрофикацию большого числа озер во всем мире.

Эвтрофикация и обуславливающие ее факторы являются главной проблемой в отношении качества воды. Множество исследований, посвященных изучению антропогенной эвтрофикации, привели к появлению большого числа количественных критериев и моделей для оценки ее развития. Более того, были разработаны различные методики для того, чтобы улучшить состояние искусственно эвтрофированных озер. Хотя недостаток многих элементов может ограничить развитие водной растительности, азот и фосфор относятся к тем элементам, недостаток которых с наибольшей вероятностью остановит рост водорослей в естественных природных водоемах. В ряде стран делались попытки остановить эвтрофирование путем запрещения использования фосфорных компонентов в моющих средствах и внедрения таких технологий очистки воды, которые позволяли бы извлекать фосфор и азот.

Влияние эвтрофикации отражается в удивительных изменениях соответствующих водных экосистем. Сильно загрязненные среды характеризуются малым числом обитающих в них биологических видов. Когда загрязнение вызвано токсичными веществами, число выживших отдельных представителей каждого вида очень мало, нередко — чрезвычайно мало. Однако при избытке биогенных веществ отдельные виды могут достигать большой численности вследствие увеличения их продуктивности, но это сопровождается уменьшением разнообразия видов из-за уничтожения некоторых из них, не способных противостоять ухудшению условий обитания.

Более подробную информацию об искусственном эвтрофировании и возможных путях решения этой проблемы можно найти в публикациях Henderson-Sellers and Markland (1987), Harper (1991) и Ryding and Rast (1989).

4.9.5.2 Органические вещества и самоочищение

Большое количество загрязнений коммунального, промышленного и особенно сельскохозяйственного происхождения содержат органические вещества. Ряд процессов, происходящих в природных водах, направлен на трансформацию этих органических веществ в более или менее безвредные минеральные соединения, и этот процесс известен как самоочищение. Некоторые из этих неорганических питательных веществ вновь перерабатываются водорослями и другими продуцентами, производящими вторичное органическое загрязнение после отмирания, как и при эвтрофировании. До биологического разложения, ведущего к самоочищению, растворенные в воде органические вещества должны быть адсорбированы и задержаны на поверхности твердых частиц. Адсорбция может иметь место на поверхности твердых частиц речного дна, берегов, растений, а также взвешенных частиц.

Большая часть процессов биологического разложения сопровождается потреблением кислорода, который является ключевым фактором в процессе самоочищения. Когда потребление кислорода в воде происходит настолько быстро, что превышает скорость его поступления из атмосферы или за счет биологических процессов, протекающих с выделением кислорода, т. е. фотосинтеза, способность водной массы к аэробному самоочищению оказывается превышенной. Это происходит в том случае, когда появляются следующие условия (одно или больше):

- a) содержание органического вещества превышает способность водоема к самоочищению;
- b) процессы биологической деструкции ускоряются под влиянием определенных факторов, например повышением температуры;
- c) пополнение содержания кислорода ослабляется температурной стратификацией, ледовым покровом или другими причинами.

Если способность водоема к самоочищению превышена, наблюдается кислородное голодание и разложение органического вещества продолжается в анаэробных условиях. Это ведет к гибели многоклеточных организмов и влияет на многие виды использования водной массы. Использование водоема в подобных условиях невозможно в рекреационных и рыбохозяйственных целях и нежелательно для использования в других целях, например для водоснабжения.

4.9.5.3 Адсорбция и аккумуляция загрязняющих веществ

Некоторые вредные вещества адсорбируются поверхностью органических и неорганических взвешенных частиц. Оседая затем на дно, эти токсические вещества временно выводятся из воды. Живые организмы также способны собирать и удерживать возле себя органические и неорганические загрязняющие вещества при биохимических процессах. К примеру, концентрация некоторых пестицидов в водных организмах может быть до 300 000 раз выше того уровня, который отмечается в окружающей водной среде.

Однако под воздействием физических и биологических процессов абсорбированные вещества и вещества, накапливаемые организмами, могут впоследствии выделяться в водную массу в растворенном виде или в форме частиц. Накапливание загрязняющих веществ различными формами организмов встречается довольно редко, т. к. они являются звеньями пищевой цепи и накапливаемые организмами загрязняющие вещества переходят от организмов одного уровня к организмам другого уровня с возрастающей концентрацией. Такой процесс, называемый биомагнификацией, вызывает ртутное отравление, приводящее к известной болезни Минаматы.

4.9.5.4 Тепловое загрязнение

Тепловое загрязнение определяется как увеличение температуры воды в водном объекте по сравнению с естественным уровнем за счет сброса промышленных и коммунально-бытовых сточных вод, особенно охлаждающих вод ядерных и тепловых электростанций и других промышленных объектов.

Влияние теплового загрязнения на качество воды достаточно сложно и связано с воздействием повышенных температур на вязкость воды, снижением ее способности к растворению кислорода и возрастанием химической и биологической активности. Тепловое загрязнение также может быть фактором, способствующим термической стратификации. В результате теплового загрязнения увеличивается период биологической продуктивности, что приводит к увеличению нагрузки органического загрязнения. Кроме того, определенные виды зеленых водорослей замещаются сине-зелеными водорослями, которые передают воде нежелательные характеристики запаха, вкуса и токсичности.

Как уже отмечалось, процессы самоочищения ускоряются при более высоких температурах и, следовательно, под влиянием теплового загрязнения, причем иногда до такой степени, что может возникать внезапный дефицит кислорода. В зимний период вследствие

теплового загрязнения задерживается формирование льда, продлевая период реаэрации. Так как водные животные — хладнокровные, температура воды имеет жизненно большое значение для их роста, репродукции и выживания. Большая часть водных беспозвоночных и рыба приспосабливаются к узко определенному температурному режиму; любое отклонение от естественного состояния из-за теплового загрязнения или извлечение холодной воды из гипolimниона может привести к исчезновению отдельных их видов на данном участке реки.

4.9.6 Меры по уменьшению воздействия загрязнения на качество воды

Все меры могут быть подразделены на две группы: предупредительные и корректирующие. Везде, где только возможно, необходимо применять предупредительные меры, так как они более экономичны.

4.9.6.1 Предупредительные меры

Предупредительные меры в основном заключаются в удалении загрязняющих веществ на источниках загрязнения. Под предупредительными мерами подразумеваются обработка сточных вод, изменение промышленных технологий, изменение химических компонентов определенных промышленных продуктов за счет исключения фосфорсодержащих соединений из моющих средств и искусственное охлаждение промышленных сточных вод. Если имеет место загрязнение из различных источников, таких как пестициды, гербициды, удобрения и неконтролируемые стоки с городских территорий, а загрязняющие вещества намываются в реку или озеро с поверхности земли, уменьшение загрязнения может быть достигнуто только за счет изменения способов хозяйственной деятельности, которые приводят к неконтролируемому поступлению загрязняющих веществ, и принятия мер по уменьшению поверхностного стока и почвенной эрозии.

Значительная доля загрязняющих веществ образуется в результате эрозии почв. Предупредительные меры в этом случае требуют правильного подхода к ведению лесного хозяйства, строительству и сельскохозяйственной деятельности. И наконец, загрязнение сточными водами с мусорных свалок может достигать в локальном масштабе больших размеров. Этого можно избежать соответствующим образом располагая и проектируя такие свалки.

4.9.6.2 Корректирующие меры

Уменьшить загрязнение водного объекта после поступления в него загрязняющих веществ, как правило, трудно и дорого. В большинстве случаев это можно

сделать только применительно к тому объему воды, который забирается из водоема для различных целей, например для хозяйственно-бытового или промышленного водоснабжения. Однако в особых случаях могут предприниматься корректирующие меры для водного объекта в целом. Для рек корректирующие меры заключаются, главным образом, в проведении искусственной реаэрации или оксигенации, либо в осуществлении дночерпательных работ по извлечению загрязненных отложений. Применительно к озерам и водохранилищам могут осуществляться следующие меры:

- a) регулярное опорожнение водоема в период от падения уровня в конце осени до весеннего наполнения для взаимодействия органических веществ с воздухом в целях их аэробного разложения. Эта мера больше применима для водохранилищ и небольших прудов, чем для больших естественных озер;
- b) дночерпательные работы с помощью драги или землесосов на участках озера с наибольшим содержанием органических и загрязняющих веществ. С другой стороны, их утилизация может стать отдельной проблемой;
- c) принудительная реаэрация нагнетанием воздуха в слой воды с низким содержанием кислорода;
- d) сбор и утилизация органических веществ, представленных в виде цветущих водорослей, чрезмерно разросшейся растительности, видов рыбы, не имеющих хозяйственного значения, и т. д.

4.10 ГИДРОЭКОЛОГИЯ [ГОМС К55]

4.10.1 Введение

Некоторые виды воздействий, которые водохозяйственные проекты могут оказывать на качество воды, обсуждались в разделе 4.9. При этом любая попытка определить состояние речной экосистемы охватывает намного больше вопросов, чем просто оценку качества воды. Безусловно, чистая вода необходима, но определенно не является достаточным условием для обеспечения гарантии того, что речная экосистема пребывает в надлежащем экологически здоровом состоянии. В ходе последующего обсуждения все внимание будет сосредоточено не на химическом составе воды, предполагая, что проблем с качеством воды нет, а на других аспектах состояния реки. Прежде всего, это структура речной системы, пригодность среды обитания и биологическое разнообразие, естественные процессы, которые их определяют, и то, как на эти аспекты могут влиять строительство и управление водными проектами. Обсуждение начнется с рассмотрения настоящей необходимости в адекватном управлении речной экосистемой, а также с его целей и определения основных понятий. В то же время будут

рассмотрены фундаментальные понятия морфологии и экологии рек с уделением особого внимания больше процессам, а не организмам. Это необходимо, чтобы понять два заключительных раздела, в которых описаны основные виды воздействий водохозяйственных проектов на речные экосистемы, а также методики, применяемые обычно для их исправления и смягчения последствий.

Специалистами в области разработки и реализации проектов комплексного использования водных ресурсов являются инженеры-гидравлики и гидрологи, и в силу этого они должны привлекаться к участию в любых междисциплинарных группах, отвечающих за регулирование стока с водосбора и восстановление речных систем. Краткие обзоры по вопросам речной экологии можно найти у Мейера (Meier, 1998a) и в публикациях АПУП/ВМО (WMO/GWP, 2006); основные сведения содержат работы Джеффриса и Миллса (Jeffries and Mills, 1995), Кушинга и Алана (Cushing and Allan, 2001); исчерпывающую информацию можно найти у Аллана (Allan, 1995). Полезная информация по теме восстановления речных и озерных систем дана Национальным научно-исследовательским советом (National Research Council, 1992). Ковкс и Велкомм (Cowx and Welcomme, 1998), Федеральная межведомственная рабочая группа по реконструкции рек (FISRWG, 1998), Калов и Петтс (Calow and Petts, 1994), Бун и др. (Boon and others, 1992), Харпер и Фергюсон (Harper and Ferguson, 1995) в своих работах объединили все, что имеет отношение к управлению речными системами и реконструкции рек. Питтс и Эморос (Petts and Amoros, 1996) представили целостную картину экологических изменений речных систем. Морисава (Morisawa, 1985), Леопольд (Leopold, 1994) и Шумм (Schumm, 2005) опубликовали вводные курсы в морфологию рек.

Этот раздел, прежде всего, посвящен экологическим воздействиям водохозяйственных проектов на речные системы. Основные виды воздействий на озера уже были рассмотрены в разделе 4.9.4.

4.10.2 **Охрана и рациональное использование речных систем**

4.10.2.1 **Неотложные нужды**

Большинство рек во всем мире испытывают повсеместно происходящее ухудшение экологического состояния, обусловленное дамбами, загрязнением, заборам воды, интенсивным землепользованием, строительством каналов и русловыправительными работами, освоением пойменных площадей, введением в состав фауны или флоры экзотических видов живых организмов и растений и т. д. Вследствие этих и других вызванных деятельностью человека факторов в пресных водах отмирает или подвергается

опасности живых организмов больше, чем в любой другой экологической системе (Angermeier and Karr, 1994), а экономическое, экологическое, рекреационное и эстетическое значение многих рек значительно понизилось. По существу, пресноводные экосистемы могут считаться «биологическими ценными активами [которые] как непропорционально богатыми, так и непропорционально подверженными опасности» (Abramovitz, 1995).

Противодействие этой тенденции к ухудшению состояния речных систем требует экологически обоснованного использования водных ресурсов. Это подразумевает разработку и реализацию новых водохозяйственных проектов, по возможности в максимальной степени экологически безопасным способом, для смягчения воздействия существующих старых объектов и восстановления речных систем с ухудшенным экологическим состоянием. Основная цель таких мер должна заключаться в поддержании экологического состояния незатронутых рек и улучшении состояния пострадавших речных экосистем, возвращая их к высоким уровням нормального состояния, с тем чтобы они могли обеспечивать существование первоначально обитавших в них организмов и сред обитания, а также использоваться обществом для водоснабжения и прочих целей.

4.10.2.2 **Цели рационального природопользования**

Что имеется в виду, когда речь идет о поддержании и улучшении экологического состояния реки? Многие понимают под этим увеличение продуктивности и/или биологического разнообразия, но это антропоцентрические представления; «больше — значит лучше» в действительности не применимо для природных систем. Например, древнее ультраолиготрофное горное озеро и вытекающая из него река имеют очень низкое содержание в воде питательных веществ и являются, таким образом, почти стерильной средой. Тем не менее, они являются нетронутой водной средой, которая не может быть улучшена. На самом деле улучшение озера за счет увеличения его продуктивности, например путем обогащения его вод, вызовет эвтрофикацию со всеми вытекающими отсюда последствиями, как описано в разделе 4.9.5.1. Как видно из вышеизложенного, целью рационального использования водных экосистем не может быть увеличение их продуктивности.

Говоря простым языком, биологическое разнообразие — это разнообразие организмов и сред их обитания, которые можно обнаружить в данной экосистеме. Эта концепция привлекательна как подходящая цель для экологически обоснованного использования водных ресурсов суши и их восстановления. Вместе с тем состояние многих водных объектов ухудшено появлением в них экзотических видов флоры и фауны;

водные объекты могут иметь в более высокой степени биологическое разнообразие, но необязательно это хорошо для их систем. Следует четко понимать, что понятия естественности и причастности к данному месту должны быть рассмотрены в качестве цели рационального природопользования; это отражено у Карра (Karr, 1996) при определении понятия экологической целостности:

...способность поддерживать и сохранять сбалансированную единую адаптированную экосистему с полным набором элементов (гены, виды, сообщества) и процессов, характерных для естественной среды в данном регионе...

Водоток с высокой экологической целостностью должен отражать ненарушенные естественные условия для территории, в т. ч. наличие всех должных элементов — например биологических видов, пойменных водоемов и болот — и наличие всех естественных процессов, таких как паводки и боковая миграция. Эти условия должны характеризоваться незначительным или отсутствующим влиянием деятельности человека — условия как в национальных парках. Экосистема с высокой экологической целостностью отражает естественные эволюционные и биогеографические процессы (Angermeier and Karr, 1994). Восстановление реки до высоких уровней экологической целостности может быть невыполнимо из-за экономических, социальных или технологических трудностей. В этом случае следует стремиться к более низким уровням. Некоторые называют эту промежуточную цель реабилитацией или ренатурализацией; она также может рассматриваться как частичное восстановление.

Некоторые реки изменялись в течение столь длительного периода времени или так интенсивно, что в них сохранилось очень мало естественного от природы или совсем ничего. Другими системами, например каскадом водохранилищ гидроэлектростанций, постоянно управляют. Их площади не могут быть полностью восстановлены, а достижение экологической целостности не может быть целью их рационального использования. При этом все же можно стремиться к «экологическому здоровью», которое Карр (Karr, 1996) определил следующим образом:

Экосистема жизнеспособна, если она выполняет все свои функции нормально и надлежащим образом; она устойчива, способна восстанавливаться после многих внешних воздействий и нуждается в минимальном бережном отношении извне. Экологическое здоровье представляет собой цель для условий на участке, который находится в управлении или каким-либо иным способом интенсивно используется. Разумное использование участка не должно ухудшать его состояние для дальнейшего использования или ухудшать состояние территорий за пределами участка.

Чтобы оценить экологическую целостность и экологическое здоровье необходимо выбрать стандартное состояние, с которым будут сравниваться остальные состояния, и комплекс измеряемых экологических показателей. Например, естественное биологическое разнообразие — важный показатель экологической целостности. После того как выбрана цель восстановления — стандартное состояние — степень достижения успеха можно оценить путем сравнения измеренных значений показателей со значениями, характерными для стандартного состояния. Мейер (Meier, 1998) сделал короткий обзор значений и целей восстановления речной экосистемы. Карр и Чу (Karr and Chu, 1999) опубликовали общие сведения по использованию мультиметрических биотических индексов для оценки экологической целостности и здоровья экосистемы.

4.10.2.3 Основы рационального использования рек

Очевидно, что гораздо проще, экономичнее и эффективнее для сохранения рек поддерживать существующую экологическую целостность, чем наносить их экосистеме вред, а затем пытаться ликвидировать его с помощью восстановительных мероприятий.

Все аспекты экологического менеджмента рек должны быть основаны на надежных экологических принципах. Но это легче сказать, чем сделать, так как реки — это в высшей степени сложные природные системы, которые организованы под влиянием многих различных физических и биологических факторов. Таким образом, хорошее понимание их поведения требует серьезных знаний в гидрологии, гидравлике, речной геоморфологии и экологии рек. Экологический менеджмент рек — это междисциплинарная деятельность, в которую обычно вовлечены группы, состоящие из инженеров, физиков и биологов, а также социологов, экономистов и менеджеров. Водохозяйственные проекты могут вызвать различные воздействия на речные экосистемы, которые не могут быть поняты и поэтому предотвращены или уменьшены без определенных базовых знаний о поведении рек.

Так как междисциплинарные исследования рек проводятся относительно недавно, все еще существует некоторая путаница в отношении основных понятий. Данбар и Акрман (Dunbar and Acreman, 2001) дали следующее определение гидроэкологии:

...объединение знаний из области гидрологии, гидравлики, геоморфологии, биологии и экологии с целью прогнозирования ответной реакции пресноводной биоты и экосистем на изменение абиотических факторов во времени и пространстве.

Именно это и является предметом рассмотрения данного подраздела Руководства. Однако с теми же целями Залевски (Zalewski, 2000) определил экогидрологию как:

науку о функциональных взаимосвязях между гидрологией и биотой в пределах бассейна... новый подход к экологически устойчивому использованию водных ресурсов.

Как отметил Наттл (Nuttle, 2002), это определение, тем не менее, предполагает, что экогидрология в одно и то же время является и наукой и менеджментом. Наттл правильно заметил, что целостный подход к управлению водными ресурсами зависит от объединения гидрологической и экологической дисциплин, но, кроме научных знаний, в этот процесс должны быть вовлечены и многие другие факторы. Он дал следующее определение экогидрологии:

Отрасль знания, объединившая экологическую и гидрологическую науки, направленная на изучение влияния гидрологических процессов на распределение, строение и функционирование экосистем и на воздействия биотических процессов на элементы гидрологического цикла.

Оба определения — слишком общие и всеохватные. Экогидрология не может заниматься всем, что касается воды и экологии. Отметим также, что понятие экогидрологии использовалось в гораздо более узком контексте, имеющем отношение к роли транспирации наземных растений в глобальном круговороте воды.

Поэтому предпочтительнее использовать понятие «гидроэкология» в значении, предложенном Дунбаром и Акрманом (Dunbar and Acreman, 2001), так как

оно лучше отражает тот факт, что это понятие — гидрологическое, и что другие физические процессы частично управляют пресноводными экосистемами и организуют их, но сохраняется четкое понимание, что особое внимание уделяется экологической целостности этих систем. Другими словами, это наука о воздействии гидрологии на экологию рек и озер, а не наоборот.

4.10.3 Основные представления о речной морфологии и экологии

4.10.3.1 Элементы и границы речных экосистем

Речная экосистема состоит из множества взаимодействующих организмов различных биологических видов — биоты, которая обитает в физических условиях абиотической среды. Для выживания, роста и репродукции эти организмы нуждаются в источниках питания, а также в месте для обитания в физической окружающей среде — ареале обитания. Они также участвуют во взаимных биотических взаимоотношениях, к примеру хищничество (в роли жертвы или хищника) и борьба за выживание (борьба за ограниченные ресурсы, такие как пространство или пища).

С самого начала важно подчеркнуть, что в отношении протекающих процессов и поведения река представляет собой нечто гораздо большее, чем просто русло с водой в меженьный период, как представляется обывателю. В действительности река также включает в себя донные грунты, берега и пойму. Пойма является в значительной степени горизонтальной аллювиальной

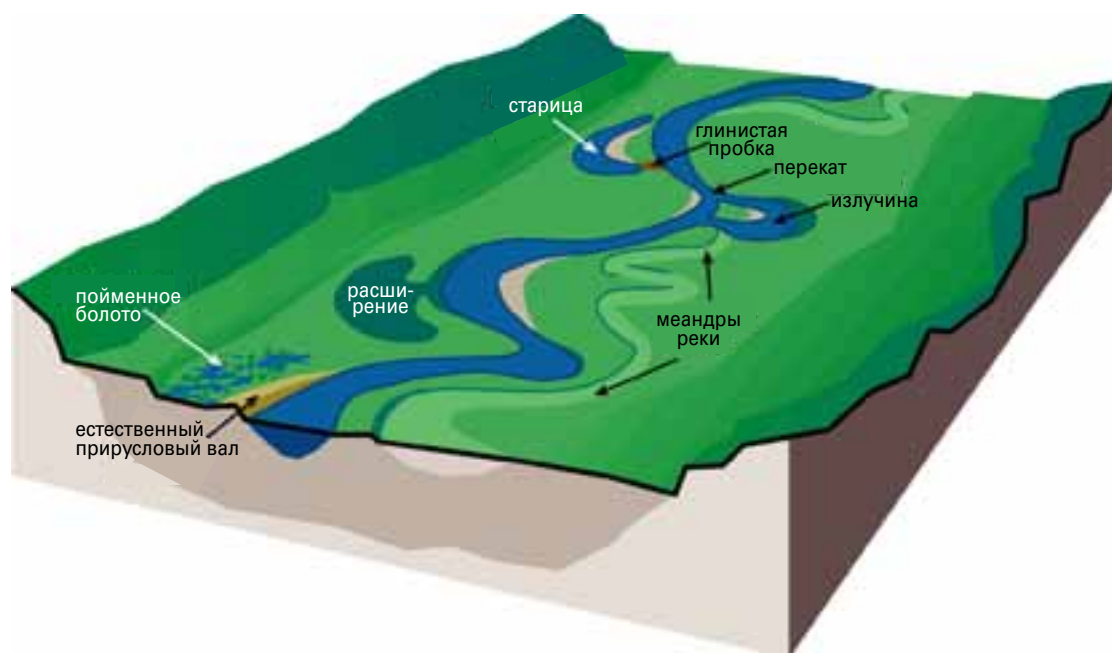


Рисунок II.4.46. Концепция речной долины меандрирующего аллювиального потока. Речная долина включает все представленные формы рельефа, в т. ч. и затопляемую пойму реки (Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 1998).

формой рельефа, прилегающей к руслу реки, отделенной от него берегами. Она формируется рекой из наносов в существующих климатических условиях и водном режиме и затопляется во время умеренных паводков. Чтобы ясно показать это различие, можно использовать понятия речного русла или речной системы. На рисунке II.4.46 показан участок извилистой реки, иллюстрирующий некоторые из этих особенностей.

Таким образом, речная система имеет расплывчатые границы с наземными системами и системами подземных вод, прибрежной и подрусловой зоной соответственно. Она включает отмели, боковые рукава, пойменные озера и другие элементы, созданные в ходе аллювиальных процессов в пределах поймы. Эти русловые и пойменные элементы меняются со временем. В связи с этим можно считать, что речная экосистема имеет три пространственных измерения: продольное — в направлении течения; поперечное — в сторону поймы; и вертикальное — в сторону аллювиальных отложений. Все они меняются со временем (Stanford and others, 1996).

4.10.3.2 Речные формы рельефа

Подавляющее большинство русел рек — аллювиальные, т. е. они сформированы неконсолидированными наносами, которые были предварительно принесены и отложены потоком. Неаллювиальные реки — это те, которые ограничены коренными породами и/или

стенами долины, так что они не способны менять форму. Как показано на рисунке II.4.47, аллювиальные формы рельефа определяются гидрологическим режимом или изменениями стока, количеством и размером наносов, поступлением древесных обломков или лесного материала, донными и береговыми материалами, а также пойменной растительностью для данного склона долины. Таким образом, вода, наносы, обломки древесины, поступая в аллювиальное русло, взаимодействуют друг с другом, с донными и береговыми материалами и пойменной растительностью. При этом они постоянно изменяют подвижные осадочные границы посредством эрозии и аккумуляции, формируя динамичное изменяющееся русло определенного рода или типа. Большинство рек находятся в режиме, известном также как устойчивое состояние или состояние динамического равновесия, для которого характерно отсутствие тренда на намыв или размыв русла. Другими словами, даже если они продолжают двигаться, их форма статистически не меняется с течением времени, так что они всегда выглядят одинаково.

В настоящее время экологи, занимающиеся вопросами рек, например Станфорд и др. (Stanford and others, 1996), придерживаются мнения, что структура сообщества — совокупности обитающих биологических видов — речных систем, подверженных наводнениям, в основном определяется динамикой установившихся физических, гидрогеоморфических процессов, а не биотическим взаимодействием. А в озерах все наоборот.

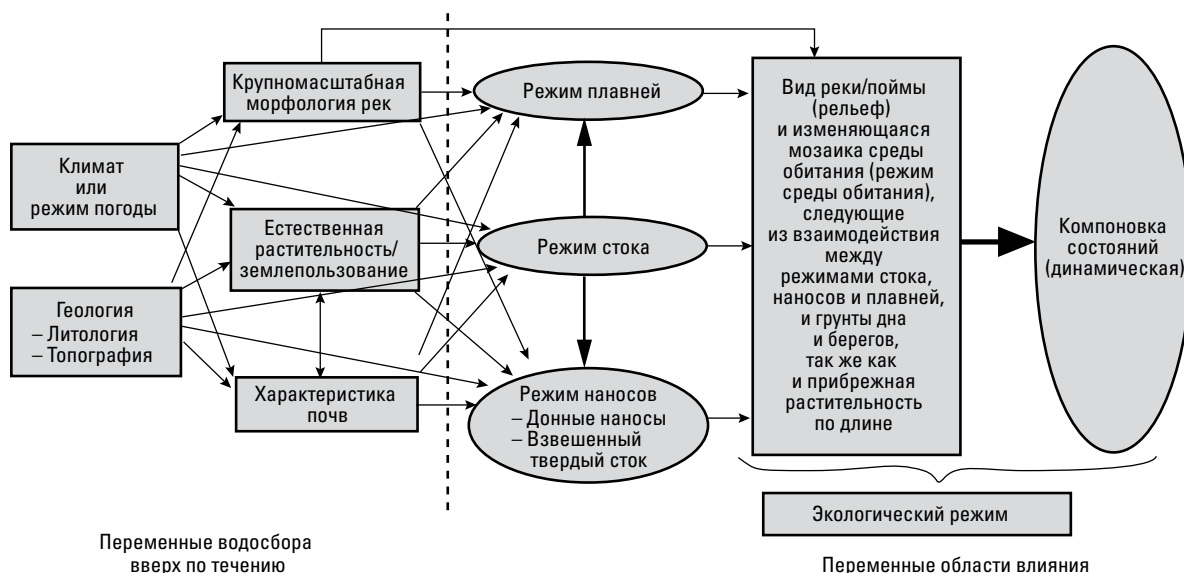


Рисунок II.4.47. Взаимодействие между параметрами водосбора, которые определяют режимы стока, наносов и павней, установившиеся на территории, простирающейся вверх по течению. Они, в свою очередь, управляют его морфологическим режимом и областью распространения — вид реки/поймы и изменяющаяся мозаика местоположения соответственно — которые вместе определяют экологический режим природной системы речной долины.

Там, где локальные климатические условия и гидрология рек препятствуют пересыханию рек и способствуют возникновению древесной растительности, пойменные системы аллювиальных рек являются из всех экосистем на Земле наиболее динамичными, сложными, разнообразными и продуктивными и, кроме того, находящимися под угрозой исчезновения. Число различных видов деревьев, растений, рыб, беспозвоночных, птиц, млекопитающих и т. д., которые могут обитать в незатронутой речной пойме — безгранично (см. рисунок II.4.48).

Как показано в левой части рисунка II.4.47, единственными независимыми величинами в данном речном бассейне в большом временном масштабе являются только его геология (или физиография: литология и топография) и климат. Местный температурный режим и режим осадков вызывают выветривание обнаженных пород, определяя характер почвы и тип растительности, которая может произрастать в пределах речного бассейна, если это имеет место. Действуя совместно на всей речной сети, эти переменные факторы задают режимы стока, наносов и поступления древесных обломков на ниже расположенных участках. Они также определяют количество детрита (листья, ветки, мелкие органические фракции грунта, которые обычно рассматриваются как корпускулярное органическое вещество), количество растворенных веществ и температурный режим потока. Человеческая деятельность, включая изменения в землепользовании, строительство дамб и противопаводочные мероприятия, самым пагубным образом сказывается на этих естественных системах многих рек мира.

Изучение и управление аллювиальными реками требует понимания их изменчивости во времени и пространстве, включая следующие три фактора, которые необходимо учитывать (Schumm, 2005):

- а) существует неизменная классификация типов рек: меандрирующие, однорукавные извилистые, блуждающие или разветвленные. Эти типы определяются водным режимом, режимом наносов, геологической историей (в частности, склонами долины), растительностью и возникновением явлений, которые могли оказать влияние. Различные типы рек используют различные механизмы для формирования поймы и взаимодействия с ней в соответствии с различными гидрологическими и геоморфологическими процессами в результате пространственной и временной морфологической изменчивости, как в самой речной системе, так и ниже, в пределах аллювиального водоносного горизонта;
- б) изменение реки в течение длительного периода времени является результатом изменения климата или изменчивости гидрологического режима;
- в) к существенной изменчивости на данном участке реки могут привести геоморфические и геологические факторы, например притоки, изменчивость грунтов береговой зоны и растительность.

Со временем под действием режима стока, в основном из-за периодических наводнений, русло перемещается по ложу долины, преобразовывая донные и пойменные отложения, таким образом, разрушая и также создавая рукава, болота, запруды и множество других форм речного ландшафта, которые быстро зарастают прибрежной растительностью. На рисунках II.4.46 и



Рисунок II.4.48. Древняя речная долина реки Палена в чилийской Патагонии, действующая меандрирующая единственная нить извилистой системы высокой экологической стабильности. Обратите внимание на разнообразие форм, глубин и скоростей воды, возраст растительных сообществ и изобилие больших древесных остатков в русле. Вода бесцветна из-за поступления в реку вод от таяния ледников. Участок молодой растительности, замеченный на излучине, справа на рисунке обозначен стрелкой.

II.4.48 показаны подобные процессы, действующие в речной аллювиальной системе, в этом случае представлен меандрирующий тип реки. Таким образом, процессы эрозии и аккумуляции наносов, взаимодействуя с ростом растительности, непрерывно изменяют не только основное русло, но фактически всю речную систему, хотя на расстоянии ландшафт может показаться неизменным, поскольку находится в состоянии динамического равновесия. Этот простой факт объясняет, почему изменения режима стока, режима наносов и цикла развития лесов, часто вызываемые реализацией водохозяйственных проектов, могут явиться причиной ширококомасштабных последствий в расположенных ниже по течению речных экосистемах: будучи изменениями трех основных компонентов функционирования реки, в силу этого они должны вызывать в результате изменения условий ландшафта.

Как уже упоминалось выше, реки различных типов передвигаются и формируют свои поймы с помощью различных механизмов. Например, меандрирующие реки смещаются в стороны за счет разрушения существующих пойменных отложений на внешней стороне изгибов русла и одновременного отложения наносов на внутренней стороне изгибов русла — процесс известен как боковое приращение; такие реки часто создают пойменные озера в старицах (см. рисунки II.4.46 и

II.4.48). В отличие от них разветвленные реки с гравийным ложем создают посреди русла отмели, которые могут зарастать растительностью. Во время паводков растительность задерживает наносы, тем самым наращивая отмель в вертикальном направлении, пока она не станет островом, который впоследствии становится частью поймы реки, после того как река оставляет один из своих рукавов. Отмели разделяют поток, тем самым создавая многорукавность.

Экологи, занимающиеся реками, обнаружили четкие взаимосвязи между типом реки и некоторыми важными экологическими показателями экологического здоровья речной системы, такими как комплексность среды обитания и биологическое разнообразие (см. рисунок II.4.49). Вот почему так важно при управлении речными системами и их восстановлении рассматривать взаимосвязи между гидрогеоморфологическими процессами и типом реки.

4.10.3.3 Речная морфология как определяющий фактор экологии рек

Как уже отмечалось, в неизменных речных системах гидрогеоморфологические процессы создают сложные среды, которые очень неоднородны как во времени, так и в пространстве. Это изменчивая мозаика русловой,

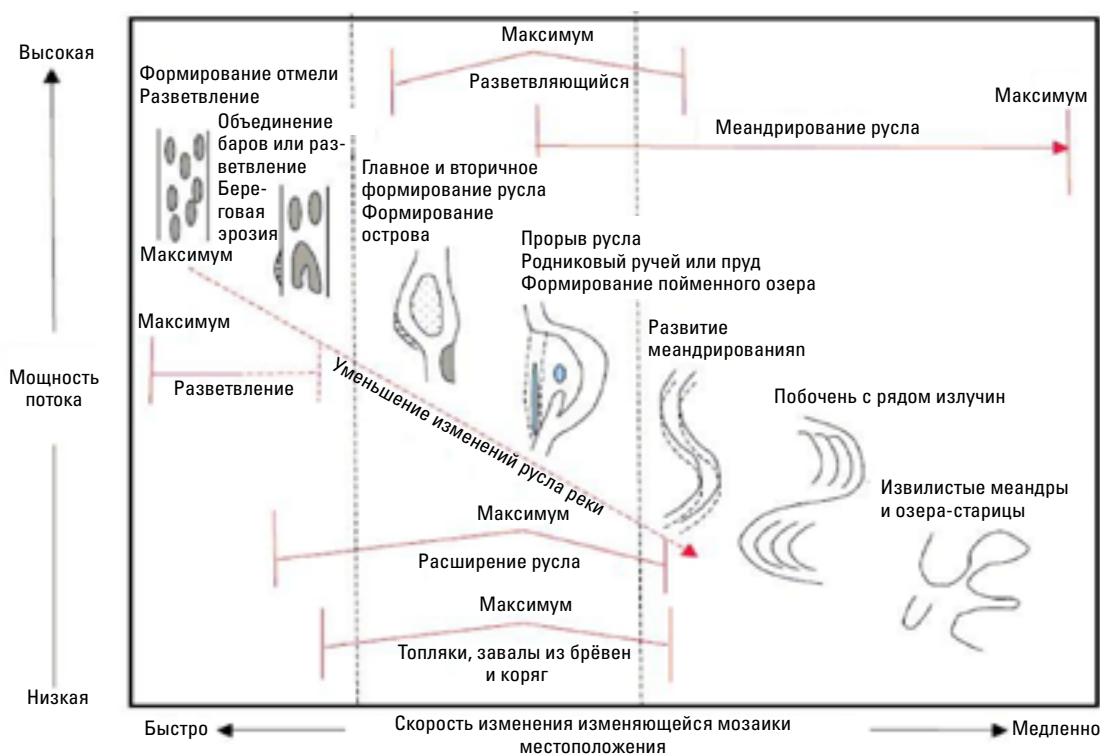


Рисунок II.4.49. Типы русловых процессов, связанные с увеличением мощности потока, с указанием переменной скорости изменения перемещающейся мозаики местоположения, так же как и некоторые соответствующие гидрогеоморфологические и биогеоморфологические процессы (сокращенно по Лорангу и Хаеру (Lorang and Hauer, 2006))

пойменной и подземной сред обитания обеспечивает пропитание и место обитания различным видам растений и животных как водным, так и прибрежным, жизненные циклы которых развиваются в соответствии с высоко динамичной и гетерогенной средой (Stanford and others, 1996). Таким образом, тип реки или поймы может рассматриваться как геоморфологический шаблон, определяющий не только плановые очертания русла, но и динамику ландшафта в пойме, таким образом, определяя шаблон ареала, доступного для организмов. Гидрология и морфология взаимодействуют, создавая условия для роста прибрежной растительности и определяя экологию речной системы через создание изменчивой мозаики ареалов.

Нетронутые речные системы весьма разнообразны и включают совокупность водных, прибрежных и подземных сред обитания. Многообразие ареалов зависит от типа реки или поймы, который определяет темпы, с которыми среды обитания меняются в пространстве и времени. Пространственная изменчивость находит свое отражение в наличии глубоководий и мелководий, песчаных и гравийных подземных сред, участков старого леса и молодой растительности, быстрин и участков с медленным течением, холодных или прозрачных ручьев и более теплых или более мутных основных потоков, сухих гравийных отмелей и илистых заболоченных земель и т. п. Временная изменчивость речных ареалов связана с различными сроками: суточные (день–ночь) циклы влияют на температуру воды; в сезонном масштабе циклы наводнений ведут к затоплениям поймы и изменениям взаимосвязи реки с ее вторичными водными средами обитания (пруды, болота, рукава), в то время как лиственные деревья сбрасывают листву, способствуя формированию органического детрита; в геоморфологическом масштабе, который определяется типом реки, создаются и уничтожаются ландшафтные формы, что изменяет мозаику сред обитания. Отметим, что концепция изменяющейся мозаики сред обитания неявно включает в себя как временную (изменяющаяся), так и пространственную (мозаика) изменчивость, присущую природным речным системам.

Экологи показали, что чем сложнее среда обитания в речной системе, тем больше биологическое разнообразие, которое она может поддерживать. Действительно, для того чтобы выжить, развиваться и размножаться, организмы нуждаются в пище и месте обитания — ареале — в пределах той физической среды, где они живут. Эти требования специфичны для каждого биологического вида, и, кроме того, у каждого биологического вида могут быть различные пищевые потребности и требования к среде обитания на разных этапах своей жизни, например икра бурой форели, мальки и взрослые особи или гнездящиеся утки по сравнению с молодыми утками. Ключевым моментом

здесь является то, что отдельные реки должны обеспечивать весь спектр потребностей биологических видов для постоянного проживания в ней. Это объясняет, почему разнообразные сложные среды способны принять гораздо большее разнообразие организмов, чем однородная среда.

Представители большинства видов имеют различные требования к среде обитания не только по мере старения, но и, кроме того, в разное время суток или во время сезонных циклов. Это означает, что отдельные особи должны иметь возможность передвигаться между различными ареалами. Они могут переместиться только однажды за все время жизни по руслу реки, как в случае с некоторыми видами лосося, мигрирующими из океана к верховьям, или ежедневно, например когда особь смещается между местом кормления на порогах и местом отдыха под береговым склоном. Движение может осуществляться в поперечном направлении, например, когда отдельные виды рыбы используют ареалы в рукавах реки для нереста, как показано на рисунке II.4.50. Многие виды имеют «пятнистое» пространственное распределение с несколькими представителями в каждом ареале. Движение между связанными ареалами, которое требует высокой способности к установлению связей, защищает такие виды от локального вымирания.

4.10.4 Экологические последствия водохозяйственных проектов

4.10.4.1 Значение изменений, неоднородности и способности к установлению связей

Изменения, вызываемые нарушением режима, являются важным компонентом здоровой экосистемы реки, что необходимо поддерживать при принятии

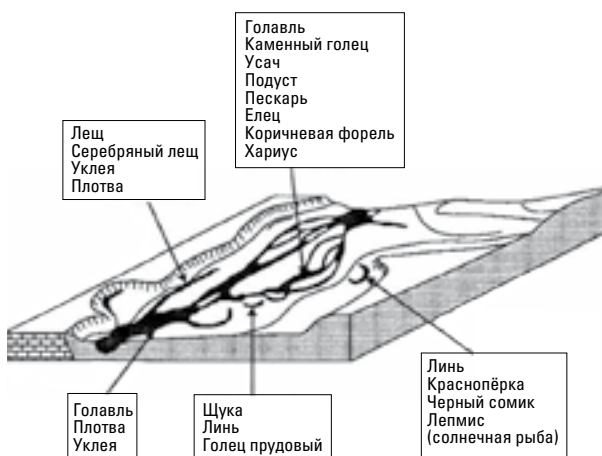


Рисунок II.4.50. Использование мест нереста различными видами рыбы в блуждающей в верховьях реки Роны, Франция (Roux and Copp, 1996)

решения о проектировании и эксплуатации водохозяйственных объектов, или восстанавливать, если необходимо смягчить воздействие производимых работ. Действительно, во многих случаях превосходные результаты при восстановлении могут быть достигнуты путем простого исключения факторов, оказывающих давление на речную систему: восстановлением режима естественного стока, режима наносов и цикла развития растительности при отсутствии необходимости дальнейшей эксплуатации реки.

Если сложная речная система не может быть изменена, например путем предотвращения возникновения паводков или отделения поймы от основного русла береговыми насыпями, то старые ареалы не будут разрушены, а новые среды обитания не будут созданы, сдерживая распространение саженцев. Это приведет к прогрессирующему старению пойменных лесов, т. е. существующая растительность достигнет пика развития и захватит изначально разнородный речной ландшафт. В результате сформируется однородная речная система, которая может поддерживать меньшее биологическое разнообразие. Этот пример показывает, что не только морфология реки, но и совокупность ее сред обитания находится в состоянии динамического равновесия, в котором отдельные ареалы постоянно изменяются. Однако общая совокупность различных типов сред обитания остается более или менее неизменной на всем протяжении реки. Концептуальная модель режима поведения сред обитания в речной системе была описана раньше как изменение мозаики ареалов.

Водохозяйственные проекты, как правило, направлены на повышение устойчивости, упрощение и разделение речных систем, вызывая в результате пространственно-однородные условия, которые не в состоянии обеспечить разнообразные среды обитания для самых разных биологических видов. Например, строительство каналов на реках между дамбами, в результате чего формируется однообразное трапецевидное поперечное сечение с равными глубинами или скоростями течения и отсутствием связи между основным каналом и элементами поймы, которые остаются безводными за дамбами в период паводков. Аллювиальная река на рисунке II.4.50 характеризуется разнообразием водных сред, используемых для нереста многих видов рыб. Если на этой реке построить канал для судоходства, то в конечном итоге это будет равномерно глубокий, узкий одиночный водоток с гораздо меньшей неоднородностью. Многие среды обитания в боковых рукавах и пойме будут потеряны, и в результате резко уменьшится разнообразие видов рыб.

К сожалению, гидротехнические сооружения в целом влияют на временную динамику реки, препятствуя ее изменению. Например, когда паводки регулируются

плотинами, гидрогеоморфологические процессы более не могут перерабатывать пойменные отложения с вышеупомянутыми последствиями.

В речных системах с большим запасом энергии, имеющих большие уклоны и/или испытывающих воздействие паводков в зависимости от размера наносов, тип нарушения, а именно скорость, с которой ареалы обитания создаются и уничтожаются, может быть слишком высокой для обеспечения богатого биологического разнообразия. Типичными примерами являются петляющие реки с гравийным и песчаным ложем, где отмели и острова так часто обновляются, что большая часть русловых ареалов обитания относительно недавно сформировалась или слаборазвита. Напротив, меандрирующая река с небольшим запасом энергии, которая медленно смещается в сторону, возможно, может иметь пойму, заросшую старой растительностью, с небольшой возможностью формирования новых ареалов обитания. Такая система будет также слишком однородной для поддержания высокого биологического разнообразия. Действительно, была выдвинута гипотеза, что разнообразие является максимальным в речных экосистемах с промежуточным уровнем нарушения, т. е. со средним запасом энергии. Такая картина соответствует типу рек между однорукавным извилистым потоком и блуждающим, с низкой тенденцией к формированию петель, высоким уровнем ветвления или многорукавности, умеренной извилистостью, сохранением больших древесных обломков и сильной тенденцией к формированию отмелей, как показано на рисунке II.4.49. Другими словами, слишком большие изменения — непрерывный возврат системы к исходному состоянию, или слишком малые изменения — сохранение одного типа ареалов, доминирующего над всеми остальными, приводит к снижению разнообразия.

Таким образом, чистая вода является лишь одним из многих компонентов здоровой экосистемы реки.

4.10.4.2 Некоторые периодические воздействия

Большинство водохозяйственных проектов предусматривают формирование каналов или русловыправительные работы, регулирование стока и забор воды, вызывая изменения режима стока, режима наносов, цикла развития лесов и нарушая экологические связи вдоль реки, уменьшая тем самым экологическую целостность речной системы. Последствия других изменений в результате деятельности человека, вызванные, например, загрязнением и чрезмерным промыслом рыбы, как правило, обратимы, и мероприятия по смягчению их последствий хорошо работают, за исключением исчезновения вида, которое редко обратимо. Окончательное разрешение проблемы трудно

или даже невозможно получить в случаях диффузного или неточечного загрязнения и вторжения экзотических видов, таких как случай появления паразитарной морской миноги в районе Великих озер.

Воздействия дамб, заборов воды и строительства каналов периодически демонстрируются на примерах разных рек во всем мире (Stanford and others, 1996; Brookes, 1988; Petts, 1984). К ним относятся следующие воздействия:

- а) разнообразие сред обитания и их связь уменьшаются: режимы стока, отложения наносов и цикл развития лесов изменяются, влияя на речную динамику, которая определяет разнородные русловые и пойменные ареалы. Продольная связь между средами обитания прерывается плотинами, что ведет, например, к проблеме миграции рыбы. Сезонная изменчивость стока снижается, но часовой или суточный расход воды могут сильно колебаться. Естественный температурный режим нарушается из-за уменьшения объема гипolimниона. Строительство каналов разделяет русло реки от ее поймы, изменяя базисный сток или нарушая взаимодействие подземных вод, уничтожая прибрежные среды обитания, препятствуя сезонным затоплениям поймы и, следовательно, обратной связи с руслом и создавая однородное русло. Осушение сокращает продольную протяженность реки и может привести к высокой смертности водных организмов. Отсутствие затопления позволяет растительности вторгаться в русло и там развиваться, в результате чего уменьшается разнообразие прибрежных зон. Коротко говоря, гидротехнические сооружения нарушают связи вдоль пространственных измерений реки, ведут к однородности русла и сред обитания в пойме;
- б) природное разнообразие уменьшается по мере распространения экзотических биологических видов. Изменяющиеся гидрологический и температурный режимы и условия формирования наносов не обеспечивают необходимые условия обитания для коренных видов. Однако гомогенизация сред обитания позволяет экзотическим видам лучше конкурировать. Например, в США в реке Колорадо коренные виды рыбы приспособились к экстремальным режимам мутности, температуры и стока. Благодаря этой адаптации, они хорошо выживали там, где не могли выжить экзотические виды. Однако когда были построены дамбы, началось регулирование стока и сброс холодной прозрачной воды гипolimниона. В результате началось вторжение неместного вида радужной форели и вытеснение коренных пород рыбы, что поставило их на край выживания.

Продуктивность экосистем может быть повышена за счет изменений, к примеру, когда высокие колебания стока преобразуются в постоянный в течение года расход воды или когда плотины сбрасывают прозрачные,

богатые питательными веществами воды со дна водоемов. В этом случае некоторые виды могут достигать большой популяции, но это всегда сопровождается уменьшением разнообразия из-за исчезновения многих других редких видов, которым для их выживания необходима временная изменчивость стока и пространственная изменчивость сред обитания.

Экологическое воздействие водохозяйственных объектов не всегда поддается оценке в количественном выражении в силу того, что связи между гидрологией, морфологией и экологией, точнее гидроэкологией, совсем не просты. Некоторые последствия могут быть смягчены за счет применения правильных конструктивных и эксплуатационных методик (см. Petts, 1984; Brookes, 1988; Gore and Petts, 1989; Gardiner, 1991; National Research Council, 1992; Cowx and Welcomme, 1998). Например, технологии изъятия воды с разных глубин могут смягчить проблемы качества воды и способствовать поддержанию естественного температурного режима вниз по течению от плотины. Если необходимо установить полный режим стока с экстремальными затоплениями поймы и меженными периодами или когда требуется поперечное смещение реки с целью восстановления изменяющейся мозаики сред обитания, могут быть приняты сложные социальные и экономические решения.

4.10.5 **Смягчение экологических воздействий**

Наиболее важный вывод, который можно сделать, обобщив все сказанное на тему гидроэкологии, состоит в следующем: экологически здоровые речные системы — это очень сложные ландшафты, которые зависят от непрерывного изменения для поддержания их меняющейся мозаики и взаимосвязанности сред обитания, и, таким образом, их природных сообществ. Непрерывные изменения производятся геоморфологическими факторами, связанными с возмущающими воздействиями в ходе наводнений.

Однако в той сфере деятельности, которую обычно называют экологическим менеджментом рек, в центре внимания находятся не эти фундаментальные научные концепции и то, как они могут быть использованы для эффективного сохранения или восстановления рек. Вместо этого в фокусе неизменно находятся два технических аспекта, которые с учетом сложности речных систем не имеют относительно большого значения, а именно восстановление физической среды обитания путем размещения разных структур в реках, а также определение минимального стока.

Большинство из этих подходов исключили некоторые из основных принципов поведения реки. Восстановление среды обитания за счет размещения

стационарных структур в русле направлено против естественного стремления реки к изменению. Среда обитания по сути динамическая — изменяющаяся, нефиксированная. Река изменяется и тем самым изменяет среду обитания. Кроме того, этот способ расширения среды обитания, как правило, ориентирован исключительно на рыбу. Конечно, такие знания могут быть полезны при восстановлении экологии рек, которые не должны смещаться в стороны, например в городских условиях. Примеры и дальнейшие замечания по этому подходу можно найти у Коукса и Велкома (Cox and Welcomme, 1998).

Минимальный русловой сток (см. раздел 4.6.2.3.5), который во многих странах называют экологическим стоком, в целом подразумевает больше, чем следует из названия: минимальный круглогодичный постоянный сток для поддержания водной экосистемы. Однако методология позволяет рассмотреть лишь некоторые аспекты, которые были описаны ранее как основополагающие для речной системы в целях поддержания или восстановления до высокого уровня экологического здоровья или целостности. В самом деле, методология минимального руслового стока определяет величины стока, которые считаются нормальными для различных целей, устанавливая рациональные цели и используя модели, основанные на теории или полевых данных, для отображения связей со стоком, что позволяет получить хорошие результаты.

Одной из основных проблем является то, что большинство моделей экологического стока были основаны на итоговых результатах причинно-следственной цепи, а не процессов, которые, в первую очередь, сформировали среду обитания. До конца 1990-х годов существовали различные методики. Гидрологические методики устанавливали простые процентные отношения или более сложные функции имеющегося стока. Гидравлические методы пытались сохранить соотношение имеющихся сред обитания на основе концепции маргинальности. Модели сред обитания определяли доступные среды обитания на определенном этапе жизни данного вида на основе критериев пригодности среды обитания. Гидравлическое моделирование рек при изменении стока — это еще один метод. Джоветт (Jowett, 1997) сравнивает эти методы и предлагает ссылки на соответствующую литературу.

Методология блочного строения (Tharme and King, 1998) была первой из новой серии моделей руслового стока, которые были отмечены целостной методологией из-за того, что они обращаются к требованиям к стоку всей речной экосистемы и основаны на определенных связях между изменениями водного режима и последствиями для биофизической окружающей среды. Этот подход использует результаты биологических исследований, для того чтобы установить необходимые

величины стока с целью соответствия различным экологическим критериям в течение года, таким как, например, связность нерестилищ в рукавах русла и путей миграции рыбы. Различные величины стока, требуемые в течение определенных месяцев или сезонов года, затем используются в качестве блоков для формирования общего русла гидрографа руслового стока. Можно также учесть межгодовую изменчивость, определяя гидрографы стока для засушливых, средних по водности и многоводных лет. Тарм (Tharme, 2003) представил глобальную оценку методологий определения руслового стока, сопоставив целостные подходы с тремя предыдущими типами и предложив исчерпывающий список со ссылками, состоящий из 207 отдельных методов, разработанных в то время.

Представляется совершенно очевидным, что целостные методологии основаны на переходе «от общего к частному» в отличие от моделей среды обитания, в которых по определению используется подход «от частного к общему» или упрощение. Если гидрологические и гидравлические модели и модели среды обитания, можно утверждать, уделяют особое внимание самым низким уровням экологической цепи или симптомам, то целостные методологии, как можно видеть, сфокусированы на промежуточных уровнях причинности. Здесь следует соблюдать осторожность просто потому, что сток не объясняет все экологические изменения в реке. Как отмечалось ранее, взаимодействие между режимами стока, наносов и циклом развития леса, наряду с русловыми отложениями и растительностью, определяет морфологический тип реки и, таким образом, изменение мозаики сред обитания. Температурный режим также имеет значение, т. к. водные организмы в основном хладнокровные. Таким образом, любое применение целостного подхода к оценке экологического стока в пострадавших реках должно учитывать восстановление естественного режима наносов, цикла развития лесов и температурные условия.

Так как характерным признаком речной экосистемы является изменение мозаики сред обитания, которая зависит от геоморфологических особенностей данного типа реки, то будет возможно использовать методику руслового стока, чтобы сосредоточить внимание на этих причинных механизмах, а не искать дальше по причинно-следственной цепи. Хотя следует признать, что тип реки и последующее изменение мозаики сред обитания в основном могут быть определены стоком выше определенного порога, а организмам в реке необходимо выживать там круглый год, в этом направлении фактически были предприняты некоторые исследования. Например, Лоранг и др. (Lorang and others, 2005) использовали дистанционные проекции для оценки геоморфологической работы в распределенном режиме — пиксель за пикселем — через пойменный участок реки с гравийным ложем. Они сделали это

в определенном диапазоне стока, выполняя на основе данных моделирование энергии потока в каждом пикселе как функцию стока. Объединив этот вид исследований с моделями переноса наносов и гидравлическими моделями, можно прийти к гидроэкологическим методам, которые будут оценивать величину и продолжительность стока, необходимого для того, чтобы поддерживать тип реки и изменение мозаики сред обитания в реке.

Это направление исследований открывает широкие возможности в будущем, потому что геоморфологические работы требуют интеграции переменных, например путем объединения различными способами величины и продолжительности, обеспечивая тем самым желанную гибкость. Кроме того, такого рода результаты могут быть легко добавлены в качестве дополнительного блока в целостную методику руслового стока, обеспечивая сохранение основных факторов, определяющих экологическое здоровье и целостность рек.

Ссылки и дополнительная литература

- Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), 2001: *Изменение климата, 2001 г.: Научная основа*. Нью-Йорк: Кембридж юниверсити пресс.
- , 2007: *Четвертый доклад об оценке — Изменение климата, 2007 г.* Женева.
- Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры/Всемирная Метеорологическая Организация (ЮНЕСКО/ВМО), 1992: *Международный гидрологический словарь*. Третье издание.
- Сванидзе Г.Г., 1977: Математическое моделирование гидрологических рядов (Mathematical modelling of hydrological series). Ленинград, Гидрометеиздат. Также опубликовано на английском языке: 1980. Публикации по вопросам водных ресурсов.
- Abramovitz, J.N., 1995: *Freshwater failures: The crises on five continents*. Washington, DC, World Watch 8, pp. 27–35.
- Allan, J.D., 1995: *Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters*. London, Chapman & Hall.
- Allen G. Richard, Luis S. Pereira, Dirk Raes and Martin Smith, 1998: *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Angermeier, P.L. and J.R. Karr, 1994: Biological integrity versus biological diversity as policy directives: Protecting biotic resources. *Bioscience*, 44(10):690–697.
- Apmann, R.P., 1972: Flow processes in open channel bands. *Journal of the Hydraulics Division*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 98:785–809.
- ASCE, 1992: *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*. Urban Water Resources Research Council of The American Society of Civil Engineers and the Water Environment Federation. 715 pp.
- Ayres, R.S. and D.W. Westcot, 1985: *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Basson, M.S., C. Triebel and J. Van Rooyen, 1988: Analysis of a multi-basin water resource system: A case study of the Vall River system. IWRA VIth World Congress on Water Resources, Ottawa, Canada.
- Basson, M.S., R.B. Allen, G.G.S Pegram and J.A. Van Rooyen, 1994: *Probabilistic Management of Water Resource and Hydropower Systems*. Highlands Ranch, Colorado, Water Resource Publications.
- Bastiaanssen, W.G.M., 1998: Remote-sensing in water resources management: the state of the art. Colombo, International Water Management Institute, 118 pp.
- Beschta, 1987: Conceptual models of sediment transport in streams. In: *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers* (C.R. Thorne, J.C. Bathurst and R.D. Hey, eds). John Wiley & Sons, pp. 396–397.
- Boon, P.J., P. Calow and G.E. Petts, 1992: *River Conservation and Management*. Chichester, Wiley.
- Box, G.E.P. and G.M. Jenkins, 1970: *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco, Holden-Day.
- Brookes, A., 1988: *Channelized Rivers: Perspectives for Environmental Management*. Chichester, Wiley.
- Brookes, A. and F.D. Shields, 1996: *River Channel Restoration: Guiding Principles for Sustainable Projects*. Chichester, Wiley.
- Calow, P. and G.E. Petts, 1994: *The Rivers Handbook*, Volumes 1 and 2. Oxford, Blackwell.
- Campana, N. and C.E.M. Tucci, 1994: Estimativa de área impermeável de macro-bacias urbanas. *Revista Brasileira de Engenharia – Caderno de Recursos Hídricos* 12:2, December.
- Chin, D.A., 2006: *Water Quality Engineering in Natural Systems*. New York, Wiley-Interscience.
- Chow, V.T. (ed.), 1964: *Handbook of Applied Hydrology*. New York, McGraw-Hill.
- Chowdary, V.M., N.H. Rao and P.B.S. Sarma, 2003: GIS-based decision support system for groundwater assessment in large irrigation project areas. *Agricultural Water Management*, 62:229–252.
- CIWEM (Chartered Institution of Water and Environmental Management), 1989: *River Engineering – Part II, Structures and Coastal Defence Works*. London.
- Cousot, P., 1997: *Mudflow Rheology and Dynamics*, IAHR Monograph Series. Rotterdam, A.A. Balkema, 255 pp.
- Cowx, I.G. and R.L. Welcomme (eds), 1998: *Rehabilitation of Rivers for Fish*. Oxford, Fishing News Books (Blackwell Science).
- Cushing, C.E. and J.D. Allan, 2001: *Streams: Their Ecology and Life*. San Diego, California, Academic Press.
- CWC (India), 1997: Draft guidelines for planning of conjunctive use in irrigation projects. Central Water Commission, Ministry of Water Resources, Government of India.
- Danish Hydraulics Institute (DHI), 1990: *MOUSE Modelling of Urban Sewer Systems on Microcomputers. Users Guide and Technical Reference*. Edition 3.0.
- Dastane, N.G., 1972: Effective Rainfall. FAO Irrigation and Drainage Paper 25. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Desbordes, M and E. Servat, 1988: 'Towards a specific approach of urban hydrology in Africa' In: Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas. Proceedings Duisburg Conf., Urban Water 88, April 231–237.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt, 1977: *Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Doorenbos, J. and A.H. Kassam, 1979: *Yield Response to Water*. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Dunbar, M.J. and M.C. Acreman, 2001: Applied hydro-ecological science for the twenty-first century. In: *Hydro-Ecology: Linking Hydrology and Aquatic Ecology* (M.C. Acreman, ed.). IAHS Publication No. 266. Wallingford, IAHS Press, pp. 1–17.
- Engelund, F. and E. Hansen, 1967: *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Denmark, Teknisk Forlag.
- Engman, E.T. and R.J. Gurney, 1991: *Remote-sensing in Hydrology*. London, Chapman and Hall, 225 pp.
- Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG), 1998: *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*. GPO Item No. 0120-A; SuDocs No. A 57.6/2:EN 3/PT.653.
- Feldman, A.D., 1995: HEC-1 flood hydrograph package. In: *Computer Models of Watershed Hydrology* (Vijay P. Singh, ed.). Fort Collins, Colorado, Water Resources Publications.
- Framji, K.K. (ed.), 1987: Improvement in irrigation management with special reference to developing countries. In: *State-of-the-Art: Irrigation, Drainage and Flood Control*, No. 4. New Delhi, International Commission on Irrigation and Drainage.
- Framji, K.K. and B.C. Garg, 1978: *Flood Control in the World – A Global Review*, Volume II. International Commission on Irrigation and Drainage.
- Garde, R.J. and K.G. Ranga Raju, 2000: *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. New Delhi, New Age International (P) Ltd. Publications, 696 pp.
- Gardiner, J.L. (ed.), 1991: *River Projects and Conservation: A Manual for Holistic Appraisal*. Chichester, Wiley.
- Gore, J.A. and G.E. Petts (eds), 1989: *Alternatives in Regulated River Management*. Boca Raton, Florida, CRC Press.
- Graf, W.H., 1984: *Hydraulics of Sediment Transport*. Littleton, Colorado, Water Resources Publications, 513 pp.
- Guy, H.P., 1970: Fluvial Sediment Concepts. Chapter C1, Book 3, Techniques of Water Resources Investigations. Washington, DC, United States Geological Survey.
- Hajilal, M.S., N.H. Rao and P.B.S. Sarma, 1998: Planning intra-seasonal irrigation requirements in large projects. *Agricultural Water Management*, 37(2):163–182.
- Harper, D.M., 1991: *Eutrophication of Freshwaters: Principles, Problems, and Restoration*. London, Chapman-Hall.
- Harper, D.M. and A.J.D. Ferguson, 1995: *The Ecological Basis for River Management*. Chichester, Wiley.
- Heaney, J.P., D. Sample and L. Wright, 2002: Costs of urban stormwater control. USEPA Report EPA/600/R-02/021, January 2002. Cincinnati, Ohio, United States Environmental Protection Agency.
- Henderson-Sellers, B. and H.R. Markland, 1987: *Decaying Lakes: The Origins and Control of Cultural Eutrophication*. Chichester, Wiley.
- Hipel, W.H., A.I. McLeod and W.C. Lennox, 1977: Advances in Box-Jenkins Modelling. *Water Resources Research*, 13(3):567–575, <http://fisher.stats.uwo.ca/faculty/aim/vita/pdf/Advances1.pdf>.
- Hughes, D.A. and P. Hannart, 2003: A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa. *Journal of Hydrology*, 270(3–4):167–181.
- Hydrologic Engineering Center (HEC), 1977: *Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model STORM: User's manual, Generalized Computer Program 723-S8-I7520*. Davis, California, Hydrologic Engineering Center, Corps of Engineers.
- Hynes, H.B., 1972: *The Ecology of Running Waters*. Toronto, University of Toronto Press.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), 1981: *Ultimate Heat Sink and Directly Associated Geat Transport Systems for Nuclear Power Plants: A Safety Guide*. Safety Series No. 50-SG-D6. Vienna.
- International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), 1996: *Manual on Non-structural Approaches to Flood Management*. Delhi.
- Jeffries, M.J. and D.H. Mills, 1995: *Freshwater Ecology: Principles and Applications*. Chichester, Wiley.
- Jowett, I.G., 1997: Instream flow methods: A comparison of approaches. *Regulated Rivers: Research and Management*, 13:115–127.
- Karr, J.R., 1996: Ecological integrity and ecological health are not the same. In: *Engineering Within Ecological Constraints* (P.C. Schulze, ed.). Washington, DC, National Academy of Engineering, pp. 97–109.
- Karr, J.R. and E.W. Chu, 1999: *Restoring Life in Running Waters*. Washington, DC, Island Press.
- Kurtas W.P. and J.M. Norman, 1996: Use of remote-sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Journal of Hydrological Sciences*, 41:495–516.
- Lawrence, I., 2001: *Integrated urban land and water management – Planning and design guidelines*. Cooperative Research Centre for Freshwater Ecology, University of Canberra, ACT 2601. Technical Report 1/2001. February 2001. Australia.
- Leopold, L.B., 1994: *A View of the River*. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press.
- Lorang, M.S. and F.R. Hauer, 2006: Fluvial geomorphic processes. In: *Methods in Stream Ecology* (F.R. Hauer and G.A. Lamberti, eds). Second edition, Chapter 7. San Diego, Academic Press/Elsevier.
- Lorang, M.S., D.C. Whited, F.R. Hauer, J.S. Kimball and J.A. Stanford, 2005: Using airborne multispectral imagery to evaluate geomorphic work across flood plains of gravel-bed rivers. *Ecological Applications*, 15(4):1209–1222.
- Loucks, D.P., J.R. Stedinger and D.A. Haith, 1981: *Water Resources Systems Planning and Analysis*. Prentice-Hall.
- Maidment, D.R. (ed.), 1992: *Handbook of Hydrology*. New York, McGraw Hill.
- Maksimovic, C. and M. Radojkovic, 1986: *Urban Drainage Catchments – Selected Worldwide Rainfall-Runoff Data from Experimental Catchments*. Oxford, Pergamon Press.
- Meier, C.I. 1998. The ecological basis of river restoration: 1. River ecology for hydraulic engineers. 2. Defining restoration from an ecological perspective. Proceedings of the Conference Engineering Approaches to Ecosystem Restoration, Denver, Colorado. Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers.

- Morisawa, M.E., 1985: *Rivers: Form and Process*. Geomorphology Texts, No. 7. London, Longman.
- Munich Re, 2006: *Annual Review: Natural Catastrophes 2005*, Knowledge series, Topics Geo. Munich. http://www.munichre.com/publications/302-04772_en.pdf.
- Musiake, K., T. Oki, T. Nakaegawa and K. Wakasa, 1995: Verification experiment of extraction of soil moisture information using SAR mounted on JERS-1 and ERS-1, Final report of JERS-1/ERS-1 Systems Verification Programme—Ministry of International Trade and Industry, Kyoto, pp. 617–624.
- National Research Council, 1973: Proceedings of the Ninth Hydrology Symposium on Fluvial Processes and Sedimentation, 8–9 May 1973, Edmonton. Ottawa, Ontario, Inland Waters Directorate, Department of the Environment.
- , 1992: *Restoration of Aquatic Ecosystems*. Washington, DC, National Academy Press.
- Negev, M., 1972: Suspended Sediment Discharge in Western Watersheds of Israel. Hydrological Paper 14. Jerusalem, Hydrological Service.
- Neill, C.R., 1973: *Guide to Bridge Hydraulics*. Roads and Transportation Association of Canada. Toronto, University of Toronto Press.
- Nuttle, W.K., 2002: Is ecohydrology one idea or many? *Hydrological Sciences Journal*, 47:805–807.
- Odum, E. and G.W. Barrett, 2004: *Fundamentals of Ecology*. Fifth edition. Brooks Cole.
- Pegram, G.G.S. and R.S. McKenzie, 1991: Synthetic streamflow generation in the Vaal River system study. Proceedings of the South African Institution of Civil Engineering, January, pp. 15–24.
- Permanent International Association of Navigation Congress (PIANC), 1987: Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geotextiles for inland waterways, Report of Working Group 4 to Permanent Technical Committee 1. Brussels.
- Petts, G.E., 1984: *Impounded Rivers: Perspectives for Ecological Management*. Chichester, Wiley.
- Petts, G.E. and C. Amoros (eds), 1996: *Fluvial Hydrosystems*. London: Chapman and Hall.
- Prihar, S.S., K.L. Khera, K.S. Sandhu and B.S. Sandhu, 1976: Comparison of irrigation schedules based on pan evaporation and growth stages in winter wheat, *Agronomy Journal*, 68:650–653.
- Prosser, M.J., 1986: Propeller-Induced Scour, Report RR2570, British Hydromechanics Research Association. Bedford, Cranfield.
- Rao, N.H., P.B.S. Sarma and Subhash Chander, 1988a: A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. *Agricultural Water Management*, 13(1):25–32.
- Rao, N.H., P.B.S. Sarma and Subhash Chander, 1988b: Irrigation scheduling under a limited water supply. *Agricultural Water Management*, 15(2):165–175.
- Rao, N.H. and D.H. Rees, 1992: Irrigation scheduling of rice with a crop growth simulation model. *Agricultural Systems*, 39(2):115–132.
- Raudkivi A.J., 1998: *Loose Boundary Hydraulics*. Rotterdam, A.A. Balkema, 496 pp.
- Rickenmann D., 1991: Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(11):1419–1439.
- Roux, A.L. and G.H. Copp. 1996. Fish populations in rivers. In: *Fluvial Systems* (G.E. Petts and C. Amoros, eds). Chapter 8, pp. 167–183. London: Chapman & Hall.
- Ryding, S.O. and W. Rast (eds), 1989: *The Control of Eutrophication of Lakes and Reservoirs*. Man and the Biosphere Series. Paris: UNESCO.
- Santos, R.J.L., 1998: Incerteza na estimativa do hidrograma de projeto com base em modelos hidrológicos. MSc thesis. Porto Alegre, Institute of Hydraulic Research.
- Schulze, R.E. and L.A. Perks, 2000: Assessment of the Impact of Climate Change on Hydrology and Water Resources in South Africa. ACRU Report No. 33, School of Bioresources Engineering and Environmental Hydrology, University of Natal, South Africa.
- Schumm, S.A., 2005: *River Variability and Complexity*. Cambridge, Cambridge University Press.
- SCS, 1975: Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55. Washington, United States Department of Agriculture.
- Simons, D.B. and E.V. Richardson, 1961: Forms of bed roughness in alluvial channel. *Journal of the Hydraulics Division*, 87(3):801–105.
- Singh, B., 1989: *Fundamentals of Irrigation Engineering*, Roorkee, Nem Chand & Bros.
- Smart, G.M., 1984: Sediment transport formula for steep channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, (110)3:267–276.
- Stanford, J.A., J.V. Ward, W.J. Liss, C.A. Frissel, R.N. Williams, J.A. Lichatowich and C.C. Coutant, 1996: A general protocol for restoration of regulated rivers. *Regulated Rivers: Research and Management*, 12(4–5):391–413.
- Stringham, G.E., 1988: Surge Flow Irrigation. Utah Agricultural Experiment Station Research Bulletin, 515 pp.
- Stringham, G.E. and J. Keller, 1979: Surge flow for automatic irrigation. ASCE Irrigation and Drainage Division Speciality Conference, Albuquerque, New Mexico, pp. 131–142.
- Szöllösi-Nagy, A. and C. Zevenbergen (eds), 2005: *Urban Flood Management*. London: A.A. Balkema Publishers.
- Tharme, R.E., 2003: A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5–6):397–441.
- Tharme, R.E. and J.M. King, 1998. Development of the building block methodology for instream flow assessments, and supporting research on the effects of different magnitude flows on riverine ecosystems. Water Research Commission Report No. 576/1/98, South Africa.
- Thomann, R.V. and J.A. Mueller, 1987: *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper Collins Publishers.
- Thorne C. R., J.C. Bathurst and R.D. Hey, 1987: *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*. John Wiley and Sons.
- Tucci, C.E.M. (ed.), 2001: *Urban Drainage in Humid Tropics*. Volume 1 of *Urban Drainage in Specific Climates* (C. Maksimovic, ed.). IHP-V Technical Documents in Hydrology No. 40. Paris, UNESCO. <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001228/122848eo.pdf>.

- United Nations, 1977: Mar del Plata Action Plan. United Nations Water Conference, Argentina.
- United Nations 1987: *Our Common Future*. World Commission on Environment and Development. Oxford, Oxford University Press.
- United Nations, 1992: International Conference on Water and the Environment: Development Issues for the Twenty-first Century, 26–31 January 1992, Dublin, Ireland.
- United Nations, 2000: Millennium Development Goals, Millennium Declaration. New York.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization (UNESCO/WMO), 1992: *International Glossary of Hydrology*. Third edition.
- , 1997: *Water Resources Assessment Activities: Handbook for Review of National Capabilities*.
- Urbonas, B. and P. Stahre, 1993: *Stormwater Best Management Practices and Detention*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.
- US Army Corps of Engineers (USACE), 1995: Flood Proofing Regulations. <https://www.nwo.usace.army.mil/nfpc/fpreg/ace6.htm>.
- Van Rijn, L.C., 1984: Sediment transport, part III: Bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(12):1732–1754.
- Vanoni, V.A. (ed.), 1975: *Sedimentation Engineering*. ASCE Manual 54. New York, American Society of Civil Engineers.
- Vidal, A. and J.A. Sagardoy (eds), 1995: *Use of Remote-Sensing Techniques in Irrigation and Drainage*. Water Reports 4. Proceedings of the Expert Consultation, Montpellier, France, 2–4 November 1993. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 202 pp.
- World Commission on Dams (WCD), 2000: Dams and Development. A New Framework for Decision-making. The report of the World Commission on Dams. London, Earthscan Publications.
- World Health Organization, 1988: *Urbanization and its Implications for Child Health: Potential for Action*. Geneva.
- World Meteorological Organization, 1981: *Meteorological and Hydrological Aspects of Siting and Operation of Nuclear Power Plants*. Volume II – Hydrological Aspects. Technical Note No. 170, WMO-No. 550, Geneva.
- , 1989: (Long, Yuqian), *Manual on Operational Methods for the Measurement of Sediment Transport*. WMO-No. 686, Geneva.
- World Meteorological Organization, 1992: *Hydrological Aspects of Accidental Pollution of Water Bodies*, Operational Hydrology Report No. 37, WMO No. 754, Geneva.
- , 1999: *Contaminants in Rivers and Streams – Prediction of Travel Time and Longitudinal Dispersion*. Operational Hydrology Report No. 45, WMO-No. 886, Geneva.
- , 2003: *Manual on Sediment Management and Measurement*. Operational Hydrology Report No. 47, WMO-No. 948, Geneva.
- , APFM, 2004: *Integrated Flood Management Concept Paper*, APFM Technical Document No. 1, second edition. Associated Programme on Flood Management, Geneva.
- , APFM, 2006a: *Social Aspects and Stakeholder Involvement in Integrated Flood Management*, APFM Technical Document No. 4, Flood Management Policy Series. Associated Programme on Flood Management, Geneva.
- , APFM, 2006b: *Legal and Institutional Aspects of Integrated Flood Management*, APFM Technical Document No. 2, Flood Management Policy Series. Associated Programme on Flood Management, Geneva.
- /GWP, 2006: *Environmental Aspects of Integrated Flood Management*. APFM Technical Document No. 3, Flood Management Policy Series. World Meteorological Organization/Global Water Partnership, Geneva.
- /United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1991: Progress in the implementation of the Mar del Plata Action Plan and a strategy for the 1990s. Report on Water Resources Assessment.
- Wright-McLaughlin Engineers, 1969: *Urban Storm Drainage Criteria Manual*. Two volumes. Denver, Colorado.
- Yalin M.S., 1992: *River Mechanics*. Oxford, Pergamon Press, 220 pp.
- Yalin, M.S. and A.M. Ferreria da Silva, 2001: *Fluvial Processes*. Monograph. Delft, International Association of Hydraulic Engineering and Research.
- Yen, B.C., 1986: Rainfall-runoff process on urban catchments and its modelling. In: *Proceedings of the International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchments Data*, 9–11 April 1986, Dubrovnik (C. Maksimovic and Radojkovic, eds).
- Zalewski, M., 2000: Ecohydrology: The scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological Engineering*, 16:1–8.
- Zhaohui Wan and Zhaoyin Wang, 1994: Hyperconcentrated Flow, IAHR Monograph Series, Rotterdam, A.A. Balkema, 290 pp.
-

АНАЛИЗ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

5.1 ВВЕДЕНИЕ

Задачей анализа повторяемости является проведение анализа исторического ряда наблюдений за гидрологическими переменными для оценивания вероятности повторения тех или иных значений гидрологических переменных. Используемые при анализе данные необходимо оценивать с точки зрения исходных задач, продолжительности и полноты рядов имеющихся наблюдений. Кроме того, они должны удовлетворять таким статистическим критериям, как случайность, независимость, однородность и стационарность. Анализ повторяемости может выполняться с использованием точечных, региональных или обоих видов данных. Он может также включать в себя историческую информацию и отражать естественные ограничения.

Поскольку гидрологические явления характеризуются значительной изменчивостью, случайностью и неопределенностью, следует признать, что статистический анализ гидрологических данных не всегда дает правильный результат. Источниками неопределенности анализа повторяемости могут являться репрезентативность аналитического подхода, выбор вероятностного распределения и метод оценивания параметров.

Гидрологический анализ обычно основан на использовании хорошо разработанных принципов гидродинамики, термодинамики и статистики. Тем не менее, центральной проблемой в гидрологическом анализе является применение этих принципов в природной среде, которая отличается неоднородностью, слабой освещенностью наблюдениями и лишь частичной изученностью. Анализируемые явления обычно не поддаются планированию и контролю. Анализы выполняются с целью получения информации о пространственно-временной изменчивости гидрологических переменных величин, региональных обобщений и выявления взаимосвязей между переменными величинами. Для анализа могут использоваться детерминистический, параметрический, вероятностный и стохастический методы. Анализ, основанный на детерминистическом подходе, следует закономерностям, которые описывают физические и химические процессы. При параметрическом подходе анализ выполняется посредством сравнения гидрологических данных, наблюдаемых в разных пунктах и в разное время. При вероятностном подходе анализируется частота появления различных значений гидрологических переменных. При стохастическом подходе анализируются как последовательность, так и частота появления

различных величин, часто с использованием методов, основанных на исследовании временных рядов. Результаты анализа позволяют накапливать документирование, подтверждающее динамический, нелинейный характер гидрологического цикла. В случае экстремальных явлений для нас представляет главный интерес не то, что уже произошло, а вероятность повторения этого явления в каком-либо месте в будущем.

Повторяемость многих экстремальных гидрологических явлений невозможно прогнозировать с высокой эффективностью и достаточной заблаговременностью на основе детерминистической информации. В таких случаях необходим вероятностный подход для того, чтобы отразить эту особенность при принятии решений. Если предположить, что такие явления независимы во времени, т. е. время появления и величина такого события не имеют отношения к предшествующим явлениям, анализ повторяемости может быть использован для описания вероятности наступления одного или нескольких таких явлений за пределами временного горизонта прогнозирования при принятии решения. К гидрологическим явлениям, которые обычно описываются с помощью анализа повторяемости, относятся ливневые осадки (раздел 5.7), меженный сток (раздел 5.8) и максимальный годовой сток (раздел 5.9).

Как детальность, так и точность анализа должны соответствовать качеству и адекватности выборки имеющихся данных, а также точности, требуемой при применении результатов анализа. Следует учитывать связь между стоимостью и продолжительностью проведения анализа и ожидаемой выгодой. Во многих случаях графические и очень простые расчетные методы являются более эффективными с точки зрения затрат, чем более сложные методы, и они могут быть достаточно точными с точки зрения достижения поставленных целей и получения необходимых данных. Однако широкое распространение персональных компьютеров с многоцелевым статистическим программным обеспечением и вычислительным оборудованием, например электронными таблицами, во многом позволило заменить выполнение расчетов вручную. Главное преимущество современных расчетных средств заключается в том, что они должны улучшить способность различных служб хранить, выбирать и анализировать данные. В дальнейшем графические возможности персональных компьютеров должны существенно помогать гидрологам в выполнении обзора данных и их поминании, равно как и результатов расчетов, которые они выполняют.

5.2 СТАТИСТИЧЕСКИЕ РЯДЫ И ПЕРИОДЫ ПОВТОРЯЕМОСТИ [ГОМС Н83]

При анализе повторяемости ряды представляют собой удобную последовательность данных наблюдений за какой-либо гидрологической переменной, например за часовой, суточный, сезонный или годовой интервалы времени. Если ряд таких наблюдений охватывает все явления, которые имели место в течение данного периода времени, такой ряд называется полным. Для удобства ряд часто содержит только те явления, которые по величине превышают заданный уровень. Такой ряд называют усеченным или рядом значений, превышающим пороговые значения. Если ряд включает явления, имевшие наивысшие значения в каждом отдельном году, такой ряд называется рядом годовых максимумов.

Ряд годовых максимумов обычно используется при вероятностном анализе по двум причинам. Во-первых, из-за его удобства, поскольку большая часть данных обрабатывается таким образом, что сразу получается готовый ряд годовых значений. Во-вторых, потому что существует теоретическая основа для экстраполяции таких рядов годовых данных за пределы наблюдений. При анализе усеченных рядов эта теория не проста, поскольку необходимо рассматривать процесс формирования паводков в течение всего года и распределение величины паводков, когда они случаются. Другой проблемой усеченных рядов является несоблюдение принципа независимости явлений, которые могут следовать один за другим в тесной последовательности, так же как и сезонные эффекты. Однако если скорость появления пика, превышающего пороговое значение, достаточно высока и может быть смоделирована при помощи простого двухпараметрического распределения, например со значением Пуассоновской скорости появления в модели экспоненциального превышения, равным 1,65, она должна давать более точные оценки квантилей паводков, чем соответствующий годовой анализ повторяемости паводков. Но применение метода трехпараметрического распределения, такого, например, как обобщенное распределение Парето, для описания Пуассоновской скорости появления пика, по-видимому, не имеет какого-либо преимуществ в использовании усеченных рядов, поскольку не имеет значения, сколько паводков было учтено в среднем за год (Martins and Stedinger, 2000). Не удивительно, что регистрация большого числа малых событий никак не характеризует риск возникновения очень больших событий, если только структура модели не очень жесткая.

Ограниченность ряда годовых значений заключается в том, что каждый год представлен только одним

явлением. Второе по величине явление в течение одного и того же года может даже превысить выдающиеся явления, наблюдаемые в другие годы, однако оно не попадет в ряд. Использование неполных рядов может решить эту проблему, поскольку в них рассматриваются все значения, превышающие пороговые.

Для рядов с полной продолжительностью может потребоваться применение стохастического подхода, при котором независимости переменных не требуется. Они могут также применяться для вероятностного анализа данных применительно к аридным районам, где все явления бывают редкими и практически независимыми.

Период повторяемости T данного явления представляет собой среднее число лет, в течение которых предполагается, что данное явление произойдет однажды или будет превышено только один раз. Период повторяемости есть величина, обратная величине вероятности превышения за отдельно взятый год. Если вероятность превышения за год обозначить $1/T_a$, где T_a — годовой период повторяемости, взаимосвязь между годовым периодом повторяемости и периодом повторяемости в усеченных рядах выражается формулой:

$$1/T_a = 1 - \exp \{-\lambda q_e\} = 1 - \exp \{-1/T_p\}, \quad (5.1)$$

где $T_p = 1/(\lambda q_e)$ — средний период повторяемости в усеченных рядах со скоростью появления пиковых значений λ , превышающих пороговые, и q_e — это вероятность превышения рассматриваемого уровня при наводнении. Это уравнение может быть решено относительно T_p , и тогда получаем:

$$T_p = 1 / \ln [1 - 1/T_a]. \quad (5.2)$$

T_p меньше T_a , поскольку в усеченных рядах может происходить более одного события в год. При определении периодов повторяемости более 10 лет разница в значениях повторяемости для полных и неполных рядов незначительна. В таблице II.5.1 сравниваются периоды повторяемости для полных и неполных рядов. Эта формула основана на предположении, что паводки в усеченных рядах случаются независимо во времени и протекают с постоянной скоростью; при ослаблении этого предположения получаются разные соотношения (Robson and Reed, 1999). В работе NERC (1975) отмечается, что действительные вероятностные модели прогнозирования появления пиковых значений по отношению к событиям с большим периодом повторяемости практически не важны при условии, что при работе различных моделей получается одинаковое среднее число пиков в год (см. также Cunneane, 1989).

Таблица II.5.1. Соответствующие периоды повторяемости для полных и неполных рядов

<i>Усеченные ряды</i>	<i>Полные ряды</i>
0,50	1,16
1,00	1,58
1,45	2,00
2,00	2,54
5,00	5,52
10,00	10,50

5.3 ВЕРОЯТНОСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ В ГИДРОЛОГИИ [ГОМС Н83, X00]

Вероятностное распределение используется во многих гидрологических исследованиях, например при изучении экстремально высокого и экстремально низкого стока, засух, объемов водохранилищ, количества осадков, а также при моделировании временных рядов. Основные распределения, используемые в гидрологии, приведены в таблице II.5.2. Математические определения этих распределений даны в ряде изданий (Kite, 1988; Cunnane, 1989; Bobee and Ashkar, 1991; Stedinger and others, 1993; Clark, 1994; Kottegoda and Rosso, 1997 and Hosking and Wallis, 1997).

Для моделирования гидрологических явлений, таких как экстремальные события, в литературе были предложены многочисленные вероятностные распределения. Несмотря на глубокие исследования и изучения, ни одна из практических моделей не считается основной для всех практических приложений. Следовательно, пользователь должен выбирать модель, исходя из поставленной задачи и природы имеющихся данных. Поэтому в этой главе рассмотрены только некоторые из наиболее часто употребляемых распределений. Потенциально подходящие распределения, которые хорошо отражают данные наблюдений, обычно сильно отличаются в хвосте распределения, особенно при использовании экстраполяции. При выборе распределений для экстраполяции, особенно для экстраполяции за пределами удвоенной длины имеющегося временного ряда, нет возможности следовать общим рекомендациям. Решение о том, какое именно распределение использовать, должно основываться на сравнении нескольких распределений. Достоинства и недостатки методов, которые можно использовать для этой цели, рассмотрены в разделе 5.6.

Годовые суммарные значения, такие как объемы годового стока или слой годовых осадков, стремятся

к нормальному или близкому к нему закону распределения согласно центральной предельной теореме. Месячные и недельные суммы менее симметричны, они обладают определенной асимметрией (в большинстве случаев положительной) и обычно не могут быть смоделированы с использованием нормального закона распределения. Ряды годовых экстремальных величин (максимальных или минимальных), а также значений, превышающих заданный уровень, имеют асимметричное распределение. Часть выборки, которая располагается около среднего распределения, может быть хорошо описана многими распределениями. Однако эти отдельные распределения могут существенно отличаться друг от друга в отношении значений, определенных за периоды редкой повторяемости, равно как и очень маленькой кумулятивной вероятности. Поскольку гидравлическое проектирование часто основано на оценках явлений редкой повторяемости, важно иметь возможность определить их как можно точнее. Поэтому для таких случаев выбор распределения очень важен. Вопрос о выборе распределений обсуждается в разделе выше, где описываются имеющиеся методы выбора между законами распределений. Эта тема также рассмотрена в разделе 5.6.

В общем случае математические распределения, содержащие три параметра, как это показано в таблице II.5.2, выбираются таким образом, чтобы распределение лучше всего соответствовало имеющимся данным. В некоторых случаях для описания данных используются эмпирические распределения, что позволяет не использовать теоретические параметрические распределения.

Использование теоретического распределения имеет ряд преимуществ:

- a) оно представляет однородное и единообразное представление эмпирического распределения. В результате квантили и другие статистические характеристики, рассчитанные с помощью подходящего распределения, должны быть более точными, чем вычисленные с помощью эмпирического распределения;
- b) оно дает компактную и простую для использования форму представления данных;
- c) оно способно дать более реалистичное описание диапазона и правдоподобия значений, которые может принимать случайно выбранная величина. Например, при использовании эмпирического распределения неявно принято, что нет значений больше или меньше, чем максимальное и минимальное в выборке. В большинстве случаев это абсолютно нецелесообразно.

Существует ряд фундаментальных вопросов, на которые нужно найти ответы при выборе распределения для анализа повторяемости (Stedinger and others, 1993):

- a) Каково истинное распределение, из которого получены результаты наблюдений?
- b) Согласуется ли предложенное распределение паводков с имеющимися данными для отдельного поста?
- c) Какое распределение необходимо использовать для получения достаточно точных и надежных оценок квантилей паводков и риска паводков для целей гидрологического проектирования?

К сожалению, ответ на первый вопрос никогда не найти и, если бы это удалось, особой пользы это не принесло бы. Истинное распределение данных может быть очень сложным с куда большим числом параметров, чем гидрологи надеются оценить. Следовательно, главная задача — создать хорошее, но простое приближение истинного распределения явлений. Стандартные статистические данные о точности аппроксимации и вероятностные графики могут, по крайней мере, частично дать ответ на второй вопрос, поскольку иногда они показывают, что конкретные распределения не согласуются с имеющимися данными. Существуют практические соображения для отказа от использования данного распределения для описания конкретной выборки. Например, распределение может быть ограничено сверху значением, которое занижено, таким образом, не обеспечивая приемлемых оценок экстремальных условий. На практике многие национальные службы смотрят на эту проблему с точки зрения возможности получения ответа на третий вопрос: какое распределение вместе с приемлемой процедурой «подгонки» его параметров даст хорошие оценки риска применительно к их региону мира? Следовательно, цель заключается не в поиске абсолютной истины, а в развитии практических процедур, которые с имеющимися данными или с теми, которые могут быть собраны, обеспечат хорошую аппроксимацию интересующей повторяемости явления. За последние четыре десятилетия в гидрологическом анализе повторяемости были приняты разнообразные распределения. В следующем разделе рассматриваются некоторые из них.

5.3.1 Семейство нормальных распределений: N, LN и LN3

5.3.1.1 Нормальное распределение

Нормальное распределение (N) или распределение Гаусса используется в гидрологии для описания стабильных явлений, таких как общий объем годового стока. Функция плотности вероятности для нормальной случайной переменной X дана в таблице II.5.2, и она не ограничена ни сверху, ни снизу, имеет среднее значение μ_x и дисперсию σ_x^2 . Коэффициент асимметрии для нормального распределения равен нулю, поскольку распределение симметрично. Интегральной

функции нормального распределения в формализованном виде (CDF) не существует, хотя книги по статистике включают таблицы стандартизованных величин z_p , распределенных по нормальному закону. Количество z_p — это пример фактора повторяемости, поскольку p -тый квантиль x_p по любому нормальному распределению со средним μ и дисперсией σ^2 можно выразить формулой:

$$x_p = \mu + \sigma z_p. \quad (5.3)$$

5.3.1.2 Логарифмически нормальное распределение

В общем случае распределения паводков и половодий — это распределения с положительной асимметрией, поэтому нормальным распределением они описываются не очень хорошо. Во многих случаях случайная переменная, соответствующая логарифму паводкового стока адекватно описывается нормальным распределением. Итоговое двухпараметрическое логарифмически нормальное (или логнормальное — LN) распределение имеет функции плотности вероятности, которые приведены в таблице II.5.2. Часто распределение логарифмов случайных величин X не подчиняется нормальному закону. В таких случаях перед взятием логарифмов вводится граничный параметр ζ , который может решить эту проблему, преобразуя это распределение в трехпараметрическое логнормальное (LN3) (Stedinger and others, 1993), так чтобы:

$$Y = \ln [X - \zeta] \quad (5.4)$$

имело бы нормальное распределение. Следовательно:

$$X = \zeta + \exp(Y) \quad (5.5)$$

имеет распределение LN3. Квантили логнормального распределения, выраженные через величины фактора повторяемости стандартного нормального распределения z_p , имеют следующий вид:

$$x_p = \zeta + \exp(\mu_Y + \sigma_Y z_p), \quad (5.6)$$

где μ_Y и σ_Y — соответственно среднее значение и стандартное отклонение Y . Процедуры оценивания параметров этого распределения были сравнены Стидингером (Stedinger, 1980).

5.3.2 Распределения экстремальных значений: распределение Гамбла, обобщенных экстремальных значений и Вейбулла

Гамбл (Gumbel, 1958) выделил три типа распределений экстремальных значений, которые должны описывать распределение наибольшего или наименьшего

Таблица II.5.2. Широко используемые кривые распределения (согласно Стидингеру и др., 1993)

Распределение	Плотность распределения вероятности и/или интегральная функция распределения	Диапазон	Моменты
Нормальное	$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_X^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_X}{\sigma_X}\right)^2\right]$	$-\infty < x < \infty$	μ_X и σ_X^2 , $\gamma_X = 0$
Логнормальное ^a	$f_X(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu_Y}{\sigma_Y}\right)^2\right]$	$0 < x$	$\mu_X = \exp[\mu_Y + \sigma_Y^2/2]$ $\sigma_X^2 = \mu_X^2 (\exp[\sigma_Y^2] - 1)$ $\gamma_X = 3CV_X + CV_X^3$
Пирсона, тип III	$f_X(x) = \beta [\beta(x-\xi)]^{\alpha-1} \exp[-\beta(x-\xi)] / \Gamma(\alpha)$ (для $0 < \beta$ и $\xi = 0$: $\gamma_X = 2(CV_X)$)	$0 < \alpha$ для $0 < \beta$: $\xi < x$ для $\beta < 0$: $x < \xi$	$\mu_X = \xi + \alpha/\beta$; $\sigma_X^2 = \alpha/\beta^2$ и $\gamma_X = 2/\sqrt{\alpha}$ и $\gamma_X = -2/\sqrt{\alpha}$
Логарифмическое Пирсона, тип III	$f_X(x) = \beta \{\beta[\ln(x)-\xi]\}^{\alpha-1} \exp\{-\beta[\ln(x)-\xi]\} / \alpha\Gamma(\alpha)$ (для $\beta < 0$, $0 < x < \exp(\xi)$; для $0 < \beta$, $\exp(\xi) < x < \infty$)	См. Stedinger and others (1993).	
Экспоненциальное	$f_X(x) = \beta \exp\{-\beta(x-\xi)\}$ $F_X(x) = 1 - \exp\{-\beta(x-\xi)\}$	$\xi < x$ для $0 < \beta$	$\mu_X = \xi + 1/\beta$; $\sigma_X^2 = 1/\beta^2$ $\gamma_X = 2$
Гамбла	$f_X(x) = (1/\alpha) \exp\{-(x-\xi)/\alpha - \exp[-(x-\xi)/\alpha]\}$ $F_X(x) = \exp\{-\exp[-(x-\xi)/\alpha]\}$	$-\infty < x < \infty$	$\mu_X = \xi + 0,5772 \alpha$ $\sigma_X^2 = \pi^2\alpha^2/6 = 1,645\alpha^2$; $\gamma_X = 1,1396$
Обобщенное экстремальное значение	$F_X(x) = \exp\{-[1 - \kappa(x-\xi)/\alpha]^{1/\kappa}\}$ когда $0 < \kappa$, $x < (\xi + \alpha/\kappa)$; $\kappa < 0$, $(\xi + \alpha/\kappa) < x$	$(\sigma_X^2$ существует при $-0,5 < \kappa$)	$\mu_X = \xi + (\alpha/\kappa) [1 - \Gamma(1+\kappa)]$ $\sigma_X^2 = (\alpha/\kappa)^2 [\Gamma(1+2\kappa) - \{\Gamma(1+\kappa)\}^2]$
Вейбулла	$f_X(x) = (k/\alpha) (x/\alpha)^{k-1} \exp[-(x/\alpha)^k]$ $F_X(x) = 1 - \exp[-(x/\alpha)^k]$	$0 < x$; $0 < k$, α	$\mu_X = \alpha \Gamma(1 + 1/k)$ $\sigma_X^2 = \alpha^2 [\Gamma(1 + 2/k) - \{\Gamma(1 + 1/k)\}^2]$
Обобщенное логарифмическое	$y = [1 - \kappa(x-\xi)/\alpha]^{1/\kappa}$ for $\kappa \neq 0$ $f_X(x) = (1/\alpha) [y^{(1-\kappa)}/(1+y)]^2$ $F_X(x) = 1/[1+y]$	$y = \exp[-(x-\xi)/\alpha]$ for $\kappa = 0$ (для $\kappa < 0$, $\xi + \alpha/\kappa \leq x < \infty$) (для $0 < \kappa$, $-\infty < x \leq \xi + \alpha/\kappa$)	$\mu_X = \xi + \alpha/[1/\kappa - \pi/\sin(\kappa\pi)]$ См. Ahmad and others (1998) для σ_X^2 .
Обобщенное Парето	$f_X(x) = (1/\alpha) [1 - \kappa(x-\xi)/\alpha]^{1/\kappa-1}$ $F_X(x) = 1 - [1 - \kappa(x-\xi)/\alpha]^{1/\kappa}$	(для $\kappa < 0$, $\xi \leq x < \infty$) (для $0 < \kappa$, $\xi \leq x \leq \xi + \alpha/\kappa$) (γ_X существует при $\kappa > -0,33$)	$\mu_X = \xi + \alpha/(1+\kappa)$ $\sigma_X^2 = \alpha^2/[(1+\kappa)^2(1+2\kappa)]$ $\gamma_X = 2(1-\kappa)(1+2\kappa)^{1/2}/(1+3\kappa)$
Распределение Альфана			
Тип А	$f_X(x) = \frac{1}{2m^\nu K_\nu(2\alpha)} x^{\nu-1} \exp\left[-\alpha\left(\frac{x}{m} + \frac{m}{x}\right)\right]$	для $x > 0$; $m > 0$; $\alpha > 0$; $-\infty < \alpha < \infty^b$	
Тип В	$f_X(x) = \frac{2}{m^{2\nu} ef_\nu(\alpha)} x^{2\nu-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{m}\right)^2 + \alpha\left(\frac{x}{m}\right)\right]$	для $x > 0$; $m > 0$; $\nu > 0$; $-\infty < \alpha < \infty^c$ См. Marlat (1956).	
Тип В ⁻¹	$f_X(x) = \frac{2m^{2\nu}}{ef_\nu(\alpha)} x^{-2\nu-1} \exp\left[-\left(\frac{m}{x}\right)^2 + \alpha\left(\frac{m}{x}\right)\right]$	для $x > 0$; $m > 0$; $\nu > 0$; $-\infty < \alpha < \infty^c$	

^aЗдесь $Y = \ln(X)$. Также обычно используется трехпараметрическое логнормальное распределение с $Y = \ln(X - \xi)$.

^b K_ν = модифицированная функция Бесселя, второй тип.

^c $ef_\nu(\alpha)$ = показательная функция факториала.

значения в большой выборке. Они широко применяются в гидрологии для описания самого сильного паводка или экстремально низкого стока.

5.3.2.1 Распределение Гамбла

Годовые паводки или половодья соответствуют максимальному паводковому стоку за год. Поэтому предполагаем, что их распределение может быть членом общего класса распределений экстремальных значений (EV), разработанного Гамблом (Gumbel, 1958). Пусть X_1, \dots, X_n — это совокупность максимальных годовых расходов и пусть $X = \max\{X_i\}$. Если величины X_i являются независимыми и идентично распределенными случайными величинами, не ограниченными сверху, с верхним «хвостом», похожим на экспоненту, то для больших n переменная X будет распределена по первому типу распределения экстремальных величин (EV) или по распределению Гамбла с интегральной функцией распределения, приведенной в таблице II.5.2.

Процедуры статистического оценивания рассмотрены Лэндвером и др. (Landwehr and others, 1979) и Кларком (Clarke, 1994), а Хоскинг (Hosking, 1990) показал, что L-моменты помогают получить точные оценки квантилей для выборок небольших размеров, которые являются типичными в гидрологии.

5.3.2.2 Распределение обобщенных экстремальных значений

Распределение обобщенных максимальных значений охватывает три типа распределений экстремальных значений для максимумов. Распределение Гамбла и обобщенное распределение экстремальных значений широко применяются в анализе повторяемости паводков во всем мире (Cunnane, 1989). В таблице II.5.2 приведены интегральные функции распределения для обобщенного распределения экстремальных значений.

Распределение Гамбла — это частный случай обобщенного распределения экстремальных значений, соответствующего $k = 0$. Здесь x — параметр положения, α — параметр масштаба, и k — важный параметр формы. При $k > 0$ распределение имеет конечную верхнюю границу при $\xi + \alpha/k$; при $k < 0$ распределение имеет более толстый правый хвост и не ограничено сверху.

Хоскинг и др. (Hosking and others, 1985) описывают процедуру определения L-момента, которая эффективно работает с данным распределением. L-моменты были основой многих региональных методов и метода индекса паводков, которые определяют эффект от использования распределения обобщенных экстремальных значений (Hosking and Wallis, 1997). Не так давно Мартинс и Стидингер (Martins and Stedinger, 2000) представили обобщенные методы оценивания

распределения обобщенных экстремальных значений на основе наибольшего правдоподобия, которые во многих гидрологических приложениях позволяют получить более точные значения, чем те, которые используют L-моменты.

5.3.2.3 Двухпараметрическое распределение Вейбулла

Если W_i — минимальный речной сток в различные дни года, тогда годовой минимум — это наименьшее значение из W_i , каждое из которых ограничено снизу нулем. В этом случае случайная величина $X = \min\{W_i\}$ может быть описана распределением экстремальных значений типа III для минимумов или распределением Вейбулла (см. рисунок II.5.1. и таблицу II.5.2.). При $k < 1$ плотность вероятности распределения Вейбулла стремится к бесконечности при стремлении x к нулю и медленно убывает при больших значениях x . При $k = 1$ распределение Вейбулла сокращается до экспоненциального распределения в соответствии с $\gamma = 2$. При $k > 1$ функция плотности вероятности распределения Вейбулла похожа на функцию плотности распределения Пирсона типа III для маленьких значений x и $\alpha_{P3} = k$, но в этом случае она убывает до нуля быстрее для больших значений x . Методы оценивания параметров распределения Вейбулла приведены в работе Кайт (Kite, 1988).

5.3.3 Семейство распределений Пирсона типа III

Распределения Пирсона типа III (P3) обычно используются для описания выборок экстремальных значений гидрологических данных. Теоретическое описание этого распределения можно найти у Бобе и Ашкара (Bobée and Ashkar, 1991), а также в резюме

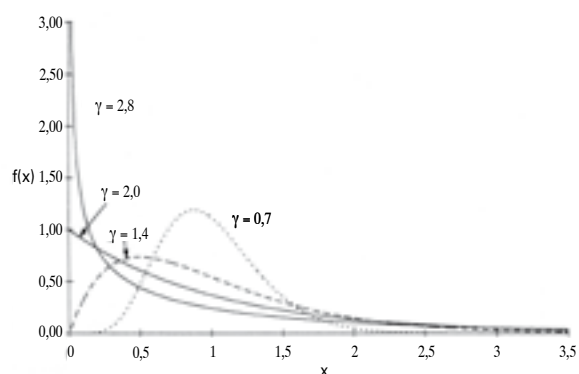


Рисунок II.5.1. Плотность вероятности для распределения Пирсона типа III с нижней границей $\xi = 0$, средним $\mu = 1$ и коэффициентами асимметрии $\gamma = 0,7, 1,4, 2,0$ и $2,8$ (представляя собой гамма-распределение и параметры формы $\alpha = 8, 2, 1$ и $0,5$ соответственно)

главы 18 в Maidment's *Handbook of Hydrology* (Учебник по гидрологии Мэйдмента) (Stedinger and others, 1993). В нем для этого распределения применяются следующие обозначения. Функция плотности вероятностного распределения Пирсона типа III P3, приведенная в таблице II.5.2., определяется тремя параметрами: месторасположением ζ , масштабом β и формой α . Для того, чтобы наилучшим образом описать имеющиеся данные при помощи этого распределения, в работе (Interagency Advisory Committee on Water Data, 1982) используется метод моментов, рассматривающий среднее значение, дисперсию и коэффициент асимметрии. Моменты необходимо использовать очень осторожно, поскольку они могут приводить к появлению верхней границы, которая может быть меньше, чем исследуемый паводок или половодье. Также для этой цели можно использовать метод наибольшего правдоподобия (Pilon and Harvey, 1992). Это распределение применимо как для положительно, так и для отрицательно асимметричных выборок.

Лог-распределение Пирсона типа III (LP3) описывает переменную x , распределение логарифма $y = \log x$ которого подчиняется закону распределения Пирсона типа III. Это распределение в 1966 г. было рекомендовано Национальным советом по водным ресурсам США для описания паводков в США, а затем в 1982 г. это было сделано снова Межведомственным консультативным комитетом по информации о водных ресурсах. Кроме того, это распределение, а также несколько других методов одобрили для использования в Канаде (Pilon and Harvey, 1992).

5.3.4 Семейство распределений Халфена: типы A, B и B⁻¹

Это семейство распределений было специально разработано для моделирования паводков и экстремальных явлений в целом. Функция плотности вероятности этих распределений приведена в таблице II.5.2. Перро и другие (Perreault and others, 1999a) представили процедуры оценки параметров, квантилей и доверительных интервалов для распределений Халфена. Гамма распределение и обратное Гамма распределение (x — обратная распределенная величина, если $y = 1/x$ распределена согласно Гамма) являются ограничивающими случаями для распределений Халфена.

Несмотря на то что функция плотности вероятности для распределений Халфена является математически более сложной, чем для трехпараметрических распределений, которые в настоящее время используются в гидрометеорологии, это не должно быть препятствием для их использования, поскольку они могут применяться с удобным для пользователя программным обеспечением, таким как HYFRAN (www.ete.inrs.ca/activites/groupes/chaire_hydrol/hyfran.html).

5.3.5 Обобщенное логистическое распределение

Обобщенное логистическое распределение появилось в гидрологической литературе благодаря Хоскингу и Уоллису (Hosking and Wallis, 1997) как распределение для анализа повторяемости паводков в Великобритании (Robson and Reed, 1999). Его параметризация схожа с обобщенным распределением экстремальных значений, и в них обоих присутствуют парето-подобные хвосты для больших значений x . Интегральная функция распределения для обобщенного логистического распределения приведена в таблице II.5.2. как размах переменной. Хоскинг и Воллис (Hosking and Wallis, 1997) и Робсон и Рид (Robson and Reed, 1999) определили, как три параметра этого распределения можно получить из оценок L-моментов.

5.3.6 Обобщенное распределение Парето

Обобщенное распределение Парето имеет очень простую математическую форму (см. таблицу II.5.2.) и очень полезно для моделирования событий, которые превосходят установленную нижнюю границу, при которой наблюдается максимум функции плотности вероятности ($k < 1$). Примерами могут служить слоистые ежедневных дождевых осадков или паводки, которые превышают незначительный предел. Хоскинг и Воллис (Hosking and Wallis, 1987) обсуждают альтернативные процедуры оценивания. Часто нижняя граница определяется физическими пределами ситуации, поэтому нужно оценивать только два параметра. Если по физическим условиям нижнюю границу определить не удалось, тогда наименьшего из наблюдаемых значений может быть достаточно для определения нижней границы значения x .

Между обобщенным распределением Парето и обобщенным распределением экстремальных значений существует очень интересное соотношение. Если пиковые значения в усеченных рядах наступают, как и в процессе Пуассона, и их значения описываются обобщенным распределением Парето, тогда годовые максимумы, превосходящие пределы усеченных рядов, подчиняются обобщенному закону распределения экстремальных значений с такими же значениями k (Stedinger and others, 1993). Ванг (Wang, 1991), Мартинс и Стиндингер (Martins and Stedinger, 2001) исследовали относительную эффективность этих двух схем моделирования.

5.3.7 Непараметрический метод оценивания плотности

Непараметрический метод не требует ни предположения о форме общей функции плотности, ни оценок

параметров, основанных на среднем значении, дисперсии и асимметрии. Непараметрическое оценивание основной плотности требует выбора функции влияния (кern-функции K), которая является функцией плотности вероятности распределения, и расчета коэффициента сглаживания H . Затем, используя выборку из N наблюдений переменной x , получают аппроксимацию функции плотности вероятности переменной x — путем присваивания каждому x_j вероятности $1/N$, и затем, используя функцию влияния для распространения этой вероятности вокруг значений x_j , получают следующее уравнение:

$$f(x) = \frac{1}{NH} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x - x_i}{H}\right). \quad (5.7)$$

Принцип базового оценивания, как показано в уравнении выше, состоит в том, что ядро заданной формы, функции треугольного, нормального распределения, или распределения Гамбла, связано с каждым наблюдением в определенном масштабе, который выражает величина H . Взвешенная сумма этих функций составляет непараметрическую оценку функции плотности. Оптимальное значение H определяется методом перекрестной проверки (Adamowski, 1985), и его можно получить с помощью пакета программного обеспечения (Pilon and others, 1992).

5.4 ПРОВЕРКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ГИПОТЕЗ

Для того чтобы результаты анализа повторяемости были теоретически обоснованными, ряды данных должны соответствовать таким статистическим критериям, как случайность, независимость, однородность и стационарность. Эти статистические критерии объяснены в таблице II.5.3, где обозначены соответствующие статистические тесты или способы проверки. Более подробные описания способов проверки можно найти в работе Хелсена и Хирша (Helsel and Hirsch, 1992). Хорошо известные статистические параметрические тесты, такие как t -тест и F -тест, в таблицу не включены, потому что ряды гидрологических данных часто не удовлетворяют некоторым жестким условиям применения этих способов проверки, в частности предположению о нормальности, которое может неблагоприятно влиять на эффективность параметрической проверки (Yue and Pilon, 2004). Тесты, занесенные в таблицу, относятся к непараметрическим, и этот тип проверки не допускает предположений о базисном параметрическом распределении данных. Необходимо внимательно относиться к проверке истинности предположений, лежащих в основе проверки, поскольку неисполнение этого требования может приводить к получению ненадежных результатов (Yue and others, 2002a).

Статистические проверки могут только указывать на значимость исследуемых тестовых статистических данных и не дают однозначного решения. Таким образом, это важно для более четкого понимания толкования результатов и подтверждения найденных значений физическими свидетельствами причин, таких как изменения в землепользовании. Когда данные не удовлетворяют предположениям, их можно преобразовать так, чтобы трансформированные данные наблюдений соответствовали критериям анализа. Когда данные не удовлетворяют предположениям, интерполяция и экстраполяция должны выполняться особенно внимательно.

5.4.1 Проверка независимости и стационарности по критерию Вальда-Вульфовитца

Для выборки данных размера N (x_1, \dots, x_N) тест Вальда-Вульфовитца рассматривает статистику R вида:

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} x_i x_{i+1} + x_1 x_N. \quad (5.8)$$

Когда элементы выборки независимы, R асимптотически приближается к асимптотически нормальному распределению со средним значением и дисперсией, выраженными следующими уравнениями:

$$\bar{R} = (s_1^2 - s_2) / (N - 1), \quad (5.9)$$

$$\text{Var}(R) = (s_2^2 - s_4) / (N - 1) - \bar{R}^2 + (s_1^4 - 4s_1^2 s_2 + 4s_1 s_3 + s_2^2 - 2s_4) / (N - 1)(N - 2), \quad (5.10)$$

где $s_r = Nm'_r$ и m'_r — это r -тые моменты выборки в области исходных значений.

Количество $(R - \bar{R}) / (\text{Var}(R))^{1/2}$ соответствует стандартизованному нормальному распределению (среднее 0 и дисперсия 1) и используется для проверки на уровне α гипотезы независимости, сравнивая $|n|$ с калиброванной нормальной переменной $u_{\alpha/2}$, соответствующей вероятности превышения $\alpha/2$.

5.4.2 Проверка Манна-Кендалла для обнаружения тренда

Тест Манна-Кендалла — это основанная на ранжировании непараметрическая проверка оценивания значимости тренда. Нулевая гипотеза H_0 заключается в том, что выборка хронологически упорядочена, независима и однозначно распределена. Статистика S имеет следующий вид (Yue and others, 2002b):

Таблица II.5.3. Статистические испытания и статистические критерии (согласно Ватту, 1989)

Случайность	Пояснение	Применимые статистические испытания
Случайность	В гидрологическом контексте случайность по существу означает, что колебания переменной являются результатом естественных причин. Например, паводковый сток, значительно измененный действием водосбора, неестественен и поэтому не может рассматриваться как случайный, пока предварительно не исключен эффект регулирования.	В наличии нет никаких подходящих испытаний для гидрологических рядов.
Независимость	Независимость подразумевает, что никакое наблюдение в ряду данных не влияет ни на какие последующие наблюдения. Даже если события в ряду случайны, они, возможно, не независимы. Большие естественные накопители, например в речном бассейне, могут заставлять максимальный сток следовать за максимальным стоком и низкий сток следовать за низким стоком. Зависимость изменяется с интервалом между последовательными элементами ряда: зависимость последовательных ежедневных значений стока имеет тенденцию усиливаться, в то время как зависимость между годовыми максимальными значениями вообще слабая. Аналогично, можно предположить, что элементы годового ряда дождевых осадков короткой продолжительности могут быть практически независимыми. В некоторых случаях, однако, может быть существенная зависимость даже между годовыми максимальными значениями, например в случае рек, текущих через очень большие накопители, такие как Великие озера Северной Америки.	<ul style="list-style-type: none"> – Тест Андерсона, как описано в работе Шоу (Chow, 1964). – Порядок ранжирования коэффициента корреляции ряда Спирмэна, как описано в NERC (1975).
Однородность	Однородность означает, что все элементы ряда данных происходят из одной генеральной совокупности. Эльдертон (Elderton, 1953) указал, что статистические данные редко получаются из строго однородного материала. Например, ряд максимального стока, который содержит как максимальный сток от таяния снегов, так и сток в результате дождевых осадков, возможно, не однороден; однако в зависимости от результатов испытаний может рассматриваться как однородный. Когда изменчивость гидрологического явления слишком высока, как в случае экстремальных осадков, неоднородность зачастую трудно распознать (Miller, 1972), однако неоднородность в годовых суммах осадков легче обнаружить.	Терри (Terry, 1952).
Стационарность	Стационарность означает, что, исключая случайные колебания, ряд данных является инвариантным относительно времени. Типы нестационарности включают в себя тренды, скачки и циклы. При анализе максимального стока скачки происходят обычно из-за резкого изменения на водосборе или в речной системе, например из-за строительства дамбы. Тренды могут быть вызваны постепенными изменениями в климатических условиях или землепользовании, например, вызванных урбанизацией. Циклы могут быть связаны с долгосрочными климатическими колебаниями.	<ul style="list-style-type: none"> – Проверка ранжированного коэффициента корреляции Спирмена на тренд (NERC, 1975). – Проверка Уальда-Вульфовитца (Wald-Wolfowitz, 1943) на тренд. Для долгопериодных циклов в наличии нет удовлетворительного метода проверки. – Проверка на тренд Манна-Кендалла (Yue and others, 2002b).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \quad (5.11)$$

где:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{если } x > 0 \\ 0 & \text{если } x = 0 \\ -1 & \text{если } x < 0. \end{cases} \quad (5.12)$$

При $n \geq 40$ статистика S — асимптотически нормально распределена со средним 0 и дисперсией, описываемой следующим уравнением:

$$\text{Var}\{S\} = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5) \right] \quad (5.13)$$

где t — размер данной связанной группы и \sum_t — сумма всех связанных групп в выборке данных. Стандартизованная проверочная статистика K — может быть рассчитана с помощью уравнения: :

$$K = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{Если } S > 0 \\ 0 & \text{Если } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{Если } S < 0. \end{cases} \quad (5.14)$$

Стандартизованная статистика K подчиняется закону стандартного нормального распределения со средним нулевым значением и единичной дисперсией. Значение вероятности P статистики K выборки можно оценить

с помощью функции нормального интегрального распределения:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-t^2/2} dt. \quad (5.15)$$

Для независимой выборки данных без тренда, значение P должно быть равно 0,5. Для выборки с большим положительным трендом — близким к 1,0; с большим отрицательным трендом значение P — близким к 0,0. Если выборки данных имеют внутрирядную корреляцию, то данные должны быть предварительно «очищены» от нее, и полученная поправка применена для вычисления дисперсии (Yue and others, 2002b).

Наклон тренда оценивается следующим образом:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_i - x_j}{i - j} \right), \forall j < i, \quad (5.16)$$

где β — это оценка наклона тренда, x_j — j -тое наблюдение. При восходящем тренде значение β — положительно, при нисходящем — β отрицательно.

5.4.3 Проверка однородности и стационарности по критерию Манна-Уитни (скачки)

Рассмотрим две выборки размеров p и q (причем $p \leq q$), когда объединенный набор из $N = p + q$ элементов упорядочивается по возрастанию. Проверка Манна-Уитни рассматривает следующие квантили:

$$V = R - p(p+1) / 2, \quad (5.17)$$

$$W = pq - V, \quad (5.18)$$

где R — сумма порядковых номеров элементов первой выборки размерности p в объединенном ряду, а значения V и W рассчитаны на основе R , p и q . V показывает, сколько раз элементы первой выборки следуют за элементами второй выборки, W рассчитывается аналогично для элементов второй выборки, следующими за элементами первой.

Тестовая статистика U определяется наименьшим значением из пары V и W . При $N > 20$; $p, q > 3$ и для нулевой гипотезы, когда выборки берутся из одной совокупности, U приблизительно подчиняется закону нормального распределения со средним значением:

$$\bar{U} = pq / 2 \quad (5.19)$$

и дисперсией:

$$\text{Var}(U) = \left[\frac{pq}{N(N-1)} \right] \left[\frac{N^3 - N}{12} - \sum T \right], \quad (5.20)$$

где $T = (J^3 - J) / 12$, где J — количество наблюдений, имеющих один порядок. Сумма $\sum T$ вычисляется для всех групп связанных наблюдений для выборок с размерностями p и q . Для проверки на уровне значимости количество $|u| = |(U - \bar{U}) / \text{Var}(U)^{1/2}|$ сравнивается с калиброванным нормальным квантилем $u_{\alpha/2}$, соответствующим вероятности превышения $\alpha / 2$.

5.4.4 Размер выборки и продолжительность ряда наблюдений

Определение стабильного распределения для оценивания вероятности данного гидрологического явления в будущем требует, чтобы выборка была достаточно большой по размеру, а продолжительность ряда наблюдений — долгой. При оценивании максимального количества ежедневных осадков продолжительность ряда наблюдений, необходимая для получения стабильного распределения, связана с общей увлажненностью региона и его физико-географическими характеристиками, которые и определяют изменчивость суточного количества осадков (Sevruk and Geiger, 1981). Как показано в таблице II.5.3, при высокой изменчивости гидрологического явления сложность тестирования однородности гидрологических рядов может возрастать. При большом коэффициенте вариации асимметричной выборки (высокой изменчивости) среднеквадратическая ошибка коэффициента асимметрии выборки, которая используется для получения гипотетического распределения, будет также большой. Севрук и Гейгер (Sevruk and Geiger, 1981) спорят о том, что анализ повторяемости экстремальных осадков за период продолжительностью 25 лет достаточно надежен во влажных регионах, таких как север Российской Федерации, однако даже 50-летний период наблюдений не дает адекватной оценки для регионов с отдельными периодическими колебаниями количества осадков. С точки зрения этих авторов, период от 40 до 50 лет в целом удовлетворяет требованиям анализа повторяемости экстремальных осадков. Юи и др. (Yue and others, 2002a), Юи и Пилон (Yue and Pilon, 2004) также показывают, как статистические характеристики выборки и продолжительности ряда наблюдений влияют на эффективность общих статистических тестов.

5.4.5 Проверка Граббса и Бека на обнаружение выбросов

Выброс — это точка на графике данных, значение которой сильно отличается от основного массива данных. Наличие выбросов в выборке может затруднять процесс описания этой выборки при помощи какого-либо распределения. В выборке могут быть верхние, нижние выбросы или оба вида выбросов, и они могут по-разному влиять на результаты анализа повторяемости. Несмотря на то что проблема

избавления выборки от выбросов все еще является предметом обсуждения, в настоящее время в гидрологии используются некоторые методы их идентификации и исправления. Применения этих методов описаны Советом по водным ресурсам США (1981) для анализа повторяемости наводнений или Севруком и Гейгером (Sevruk and Geiger, 1981) для экстремальных осадков.

Тест Граббса и Бека на обнаружение выбросов рекомендован Советом по водным ресурсам США (United States Water Resources Council, 1981). Для применения этого метода необходимо сделать предположение о том, что логарифмы или некоторые другие функции гидрологических рядов распределены нормально, поскольку этот тест применим только для выборок из нормальной совокупности. Предположение о том, что логарифмы значений выборки подчиняются закону нормального распределения, всегда используется Советом по водным ресурсам США. Для применения проверки Граббса и Бека рассчитываются следующие два квантили:

$$X_H = \exp(\bar{x} + K_N s), \quad (5.21)$$

$$X_L = \exp(\bar{x} - K_N s), \quad (5.22)$$

где \bar{x} и s — соответственно среднее отклонение и среднеквадратическое отклонение натуральных логарифмов выборки, и K_N — статистика Граббса и Бека, значения которой сведены в таблицу для различных размеров выборок и уровней значимости. При уровне значимости 10 процентов для оценки табличных значений используется следующая полиномиальная аппроксимация, предложенная Пилоном и Харви (Pilon and Harvey, 1992):

$$K(N) = -3,62201 + 6,2844N^{1/4} - 2,49835N^{1/2} + 0,491436N^{3/4} - 0,037911N, \quad (5.23)$$

где N — размер выборки. В применении теста Граббса и Бека любые значения выборки, большие чем X_H , считаются верхними выбросами, а меньшие чем X_L — нижними. Для $5 \leq N \leq 150$ значение $K(N)$ может быть рассчитано из следующего уравнения (Stedinger and others, 1993):

$$K(N) = -0,9043 + 3,345 \sqrt{\log(N)} - 0,4046 \log(N). \quad (5.24)$$

5.4.6 Байесовские процедуры

В то время как частотное оценивание вероятности основано на идее эксперимента, который можно повторить несколько раз, в основе подхода Байеса лежат индивидуальное оценивание вероятности и возможность принимать во внимание любую имеющуюся информацию посредством апостериорного

распределения. В отличие от классических моделей, в Байесовских моделях параметры задачи рассматриваются как случайные величины, а не как заданные. Например, при обнаружении смещения среднего значения (точек разладки) временных рядов классическими методами допускается, что нам известно время возможного смещения. Байесовский подход, тем не менее, не предусматривает никаких предположений о времени смещения. Этот метод позволяет делать заключения о таких характеристиках ряда, как положение точек разладки и размер смещения.

Перро и др. (Perreault and others, 1999c) описали возможности Байесовских моделей для нахождения единичного смещения в среднем. Перро и др. (Perreault and others, 2000) представили метод для выявления изменения в изменчивости и применили его к гидрологическим данным, а Асселин и др. (Asselin and others, 1999) представили двумерную модель Байеса для нахождения систематического изменения в среднем. Полное описание теории статистического вывода Байеса представлено в работе Бокс и Тьяо (Box and Tiao, 1973).

5.5 СТАТИСТИКИ ГЕНЕРАЛЬНЫХ СОВОКУПНОСТЕЙ И ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ

Предполагая, что экстремальные гидрологические события могут быть адекватно описаны при помощи какого-либо семейства теоретических распределений, задача гидролога сводится к определению параметров этого распределения, что в итоге позволит рассчитать квантили и другие статистические данные с помощью подходящей модели. В статистической и гидрологической литературе описано множество методов и принципов оценки параметров различных распределений: наиболее широко используемые из них рассмотрены в последующих разделах.

5.5.1 Методы вычисления параметров

Вероятно, простейшим подходом является метод моментов, при котором параметры оцениваются таким образом, чтобы теоретические моменты распределения совпадали с рассчитанными моментами по имеющейся выборке. В методе, рекомендованном федеральными органами США (Thomas, 1985; Interagency Advisory Committee on Water Data, 1982) используются моменты логарифмов паводкового стока $X = \log Q$.

Разновидностью метода моментов, который доказал свою эффективность в гидрологии при работе с обобщенным распределением экстремальных значений, является метод вероятностно-взвешенных моментов

или эквивалентно L-моментов (Hosking and others, 1985; Hosking and Wallis, 1997). Вероятностно-взвешенные моменты или соответствующие L-моменты дают возможность суммировать статистические свойства наборов гидрологических данных другим способом (Hosking, 1990). Преимущество оценивания с помощью L-моментов состоит в том, что они представляют собой линейные комбинации наблюдений и, следовательно, не включают в себя результаты наблюдений, возведенные в квадрат или в куб. В результате L-коэффициент изменения и L-асимметрии практически не искажаются, в то время как оценивание коэффициента изменения и коэффициента асимметрии по смешанным моментам дает искаженный результат и обладает высокой степенью изменчивости (Vogel and Fennessey, 1993). Это особенно ценно для методов районирования, которые будут рассмотрены далее в разделе 5.9.

L-моменты — это другой способ обобщения статистических свойств гидрологических данных, основанный на линейных комбинациях исходных данных (Hosking, 1990). Недавно гидрологи обнаружили, что методы районирования, в которых используются L-моменты, превосходят те методы, которые используют традиционные моменты. Они также хорошо работают для «подгонки» некоторых распределений к локальным данным (Hosking and others, 1985). Первый L-момент рассчитывается как среднее арифметическое:

$$\lambda_1 = E[X]. \tag{5.25}$$

Пусть $X_{(i|n)}$ — наибольшее i -тое значение наблюдений в выборке размера n ($i = 1$ соответствует наибольшему значению). Тогда для любого распределения второй L-момент является описанием масштаба на основе ожидаемой разности между двумя случайно выбранными наблюдениями:

$$\lambda_2 = (1/2) E[X_{(1|2)} - X_{(2|2)}]. \tag{5.26}$$

Аналогично L-моментные измерения асимметрии и эксцесса можно определить как:

$$\lambda_3 = (1/3) E[X_{(1|3)} - 2 X_{(2|3)} + X_{(3|3)}], \tag{5.27}$$

$$\lambda_4 = (1/4) E[X_{(1|4)} - 3 X_{(2|4)} + 3 X_{(3|4)} - X_{(4|4)}]. \tag{5.28}$$

Так же как смешанные моменты можно использовать для определения безразмерных коэффициентов изменения и асимметрии, L-моменты можно использовать для определения L-коэффициентов изменения и асимметрии (таблица II.5.4). Оценивание L-моментов часто основано на промежуточных статистиках, которые называются вероятностно-взвешенными моментами (Hosking, 1990; Hosking and Wallis, 1997; Stedinger and others, 1993). Во многих более ранних исследованиях

были использованы методы оценивания, применяющие вероятностно-взвешенные моменты, основанные на графических построениях (Hosking and others, 1985); впоследствии было обнаружено, что они недостаточно надежны и инвариантны для таких методов оценивания (Hosking and Wallis, 1995; Fill and Stedinger, 1995), поэтому последующая работа была направлена на использование методов оценивания несмещенных вероятностно-взвешенных моментов. Прямые измерения несмещенных L-моментов из выборок были описаны Вангом (Wang, 1996).

Таблица II.5.4. Безразмерные статистики, используемые для описания распределений (соотношения смешанного момента и L-момента)

Название	Обозначение	Определение
Отношения смешанного момента		
Коэффициент вариации	CV_X	σ_X/μ_X
Коэффициент асимметрии ^a	γ_X	$E[(X - \mu_X)^3]/\sigma_X^3$
Коэффициент эксцесса ^b	—	$E[(X - \mu_X)^4]/\sigma_X^4$
Отношения L-момента ^c		
L-коэффициент вариации	L-CV, τ_2	λ_2/λ_1
L-коэффициент асимметрии	L-асимметрия, τ_3	λ_3/λ_2
L-коэффициент эксцесса	L-эксцесс, τ_4	λ_4/λ_2

^aНекоторые критерии определяют $\beta_1 = \gamma^2$ как меру асимметрии.

^bНекоторые критерии определяют эксцесс как $\{E[(X - \mu_X)^4]/\sigma_X^4 - 3\}$; другие используют термин эксцесс для этого различия, потому что нормальное распределение имеет эксцесс 3.

^cДля представления определения L-CV Хоскинг (Hosking, 1990) использует τ вместо τ_2 .

Метод наибольшего правдоподобия имеет очень сильную статистическую мотивацию. Он позволяет выбирать параметры, которые делают теоретическое распределение настолько статистически соответствующим исследуемой выборке, насколько это возможно. Способы оценивания параметров методом наибольшего правдоподобия описаны в учебниках по статистике и рекомендованы к использованию с историческими и палеологическими рядами наблюдений за паводками, поскольку они особенно эффективны при работе с проверенными и категориальными наборами данных.

Непараметрические методы можно использовать при оценивании повторяемости паводкового стока, поскольку они не требуют предположений о том, что данный паводок не «вытащен» из какого-либо параметрического семейства распределений. Такие методы были адаптированы для Канады (Pilon and Harvey, 1992).

5.5.2 Использование логарифмических преобразований

Когда разброс данных по величине достаточно велик, а такое часто встречается в мониторинге качества воды, то обычно для обобщения характеристик выборки

данных или оценивания параметров распределения используют смешанные моменты логарифмов данных выборки. Логарифмическое преобразование — это эффективный метод нормализации значений, которые отличаются порядком значений, и предотвращения преобладания случайных больших значений при расчете смешанного момента. Однако при использовании логарифмических преобразований возникает опасность того, что необычно маленьким результатам наблюдений или нижним выбросам будет присвоен значительно завышенный вес. Этому следует уделять внимание, когда интерес представляют наибольшие события, а маленькие значения измерены плохо. Последние могут отражать ошибки округления или могут расцениваться как ноль, когда они оказываются меньше определенного порогового значения.

5.5.3 Историческая информация

Помимо данных, полученных за сравнительно короткий период систематических наблюдений, может быть использована дополнительная историческая информация, имеющая отношение к величине паводков и полученная до начала систематического сбора данных. Например, какая-либо станция может иметь до 1992 г. всего 20-летний период наблюдений, однако известно, что в 1900 г. был паводок, который превосходил все когда-либо наблюденные здесь паводки и который оказался максимальным с того времени, как здесь в 1860 г. было организовано поселение. Величину этого паводка и информацию о том, что в период с 1860 по 1992 гг. все паводки были ниже того, который имел место в 1900 г., можно и нужно использовать при анализе повторяемости. С другой стороны, может быть известно, что определенное число паводков с 1860 по 1972 гг. превысили некоторый порог. Эта историческая информация также должна быть использована при анализе повторяемости. Палеологические ряды наблюдений паводков создаются в результате различных исторических и физических процессов. Паводки, оставляющие после себя метки высоких вод, являются наибольшими, которые случались за рассматриваемый период, в то время как отложения наносов, принесенных паводочными водами и оставленных ими в изолированных зонах, могут показывать величину некоторых сильных паводков.

Независимо от регулярного мониторинга речного стока отдельные паводки могут быть зафиксированы просто потому, что они превысили уровень восприятия и нарушают человеческую деятельность в период наступления паводка или нанесли ущерб физическим объектам или растительности, по которым документируется событие (Stedinger and Baker, 1987; Wohl, 2000). Для оценивания параметров функции распределения по определенным видам исторической информации используют несколько методов. Это методы исторически взвешенных коэффициентов, наибольшего

правдоподобия, алгоритм ожидаемых моментов и непараметрический метод (Cohn and others, 2001; England and others, 2003; Griffis and others, 2004). Выше уже было показано, что метод наибольшего правдоподобия делает использование дополнительной информации более эффективным по сравнению с методом исторически взвешенных моментов. Оценки, полученные по методу наибольшего правдоподобия, и алгоритмы ожидаемых моментов легко приспособляемы и одинаково эффективны при работе с лог-распределением Пирсона типа III (LP3), для которого алгоритмы ожидаемых моментов и были разработаны, хотя оценивание по методу наибольшего правдоподобия часто бывает проблематичным в отношении сходимости этих расхождений.

5.5.4 Увеличение рядов наблюдений

Часто короткий ряд можно увеличить при помощи более длинного ряда наблюдений, полученных на ближайшей станции, с которым наблюдения в этом коротком ряду хорошо коррелируют. В частности, длинный ряд наблюдений на соседней станции можно использовать для улучшения оценок среднего значения и дисперсии событий, которые зафиксированы в коротком ряду. Для этой цели нет необходимости действительно реконструировать удлиненные ряды, необходимы только улучшенные оценки моментов. Эта идея увеличения рядов наблюдения разработана Маталасом и Якобсом (Matalas and Jacobs, 1964), а также описана в публикациях Межведомственного консультативного комитета по водным ресурсам (Interagency Advisory Committee on Water Data, 1982; приложение 7). Вогель и Стидингер (Vogel and Stedinger, 1985) представили свежие способы улучшения этой идеи и обсудили процесс добычи информации. Другие примеры показывают, что более длинные ряды могут быть созданы при моделировании или могут быть заархивированы. Идея использования метода увеличения длины рядов наблюдений для того, чтобы убедиться в том, что генерируемые ряды стока обладают заданным средним, дисперсией и корреляциями, предложена Хиршем (Hirsch, 1982), Вогелем и Стидингером (Vogel and Stedinger, 1985), а пути учета нескольких переменных — Грайджером и др. (Grygier and others, 1989).

5.5.5 Анализ смешанных совокупностей

Общая проблема в гидрологии заключается в том, что ряды максимальных годовых значений состоят из событий, которые могут быть результатом совершенно разных процессов. Например, осадки могут соответствовать различным типам ливней в разные времена года — это может быть летняя гроза или зимние фронтальные бури, следы тропических ураганов или результат таяния снега. Паводки, возникающие в результате этих событий, могут иметь совершенно

разные распределения. Вайлен и Ву (Waylen and Woo, 1982) отдельно изучали речной сток летом и зимние паводки из-за снеготаяния. Вогель и Стидингер (Vogel and Stedinger, 1984) изучили летние ливни и наводнения, вызванные ледяными заторами на реках. Хиршбёк и др. (Hirschboeck and others, 2000) рассматривали классификацию различных паводков, превышающих пороговые значения, по преобладающему типу синоптической погоды; в результате этого появился анализ паводков из смешанных семейств, в котором используются усеченные ряды. В некоторых горных районах на маленьких водосборах летние грозы вызывают наибольшие паводки из всего ряда наблюдений, а таяние снега — наибольшее число паводков в течение года. В этих случаях, как показано Вэйленом и Ву (Waylen and Woo, 1982), разделение ряда наблюдений на несколько отдельных рядов может помочь лучше оценить вероятность экстремальных явлений, поскольку данные, описывающие явления, которые вызывают наиболее масштабные события, в анализе представлены лучше.

Предположим, что ряд годовых максимумов M_t состоит из найденных для каждого года наибольших значений пар, состоящих из максимального летнего события S_t и максимального зимнего события W_t :

$$M_t = \max \{S_t, W_t\}. \quad (5.29)$$

Здесь S_t и W_t можно определить как жестко установленный календарный период, либо как менее жесткий климатический период, или при помощи физических и метеорологических характеристик периодов времени между наблюдаемыми явлениями.

Если значения летнего и зимнего событий статистически независимы, т. е. знание одного не влияет на условное вероятностное распределение другого, вероятностное распределение для максимального годового события M имеет вид, предложенный в работе Стидингера и др. (Stedinger and others, 1993):

$$F_M(m) = P[M = \max(S, W) \leq m] = F_S(m) F_W(m). \quad (5.30)$$

Для двух или более независимых рядов событий, вносящих вклад в годовой максимум, распределение максимумов получить легко. Если несколько статистически зависимых процессов составляют годовой максимум, то рассчитать распределения для отдельных рядов гораздо сложнее. Важно определить, целесообразно ли моделировать несколько различных компонентов рядов паводков отдельно или лучше создавать модель составных рядов максимальных годовых значений. Если смоделированы несколько рядов, то тогда нужно оценивать большее количество параметров, но, если имеются временные ряды годовых максимумов или усеченные ряды каждого типа событий, то в нашем распоряжении оказывается и больше данных для решения этой задачи.

Идея смешения двух распределений привела к развитию двухкомпонентного распределения экстремальных значений (Rossi and others, 1984), которое соответствует максимуму из двух независимых распределений EV1. Его можно рассматривать как максимум двух паводочных процессов в усеченных рядах, каждый с Пуассоновской частотой появления и экспоненциально распределенными значениями пиков паводков. В общем случае одно из распределений рассматривается как описание большинства данных, а другое — как распределение выбросов. Поскольку модель имеет четыре параметра, она является очень гибкой (Beran and others, 1986). Таким образом, если используются только ряды годовых максимумов, то для получения значений всех четырех параметров будут полезными региональные методы оценивания, хотя региональные методы оценки двухкомпонентных экстремальных значений тоже являются весьма привлекательной альтернативой. Двухкомпонентное распределение экстремальных значений эффективно было использовано в качестве основы процедуры индексирования паводков (Frances, 1998; Gabriele and Villani, 2002). Для моделирования смешанного распределения можно также использовать непараметрическое распределение (Adamowski, 1985) и распределение Уэйкби (Pilon and Harvey, 1992).

5.5.6 Анализ повторяемости и нули

Ряды межлетнего стока часто содержат годы с нулевыми значениями, а некоторые ряды максимумов для отдельных гидрологических постов также могут содержать нули. В некоторых аридных зонах нулевые потоки регистрируются чаще, чем ненулевые. Речной сток считается нулевым, когда поток был полностью сухим и когда сток находился ниже порога чувствительности наблюдений или точности записи. Это означает, что некоторые ряды межлетнего стока являются цензурированными наборами данных. Нулевые значения не должны быть просто отброшены, и они необязательно отражают точные измерения минимального потока в канале. Основываясь на гидравлической конфигурации гидрометрического поста и знании кривой расхода и принципов записи наблюдений, возможно определить величину наименьшего расхода, который можно точно оценить и который не будет принят за ноль. Для составления вероятностного распределения наборов данных, содержащих нулевые значения, целесообразно применять методы графической обработки и модель условной вероятности. Метод графического отображения положения точек, не подразумевающий наличия формальной статистической модели, часто имеет большое значение для анализа повторяемости межлетнего стока. Кривую повторяемости межлетнего стока можно определить визуально, а параметры параметрического распределения можно оценить по регрессии графика вероятностного распределения, как описано у Кролля

и Стидингера (Kroll and Stedinger, 1996) и Стидингера и др. (Stedinger and others, 1993), или же непараметрическими методами.

5.6 **ГРАФИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЕРОЯТНОСТЕЙ И ПРОВЕРКА
ПО КРИТЕРИЮ СОГЛАСИЯ**

5.6.1 **Нанесение точек на график и
распределение вероятностей**

Начальная оценка адекватности подобранного вероятностного распределения лучше всего получается при помощи построения графика плотности распределения данных наблюдений. Когда отсортированные данные наблюдений наносятся на график в подходящем масштабе, они образуют приблизительно прямую линию, не считая колебаний внутри выборки.

Такой график одновременно является и визуальным отображением информации и способом проверки, соответствует ли полученное распределение данным.

Для некоторых распределений такие графики могут быть построены на специальной имеющейся в продаже вероятностной бумаге (клетчатке), включая нормальное и двухпараметрическое лог-нормальное распределения, а также распределения Гамбла, поскольку они все имеют фиксированную форму. Однако благодаря современному программному обеспечению такие графики обычно легче строить без использования специальной бумаги (Stedinger and others, 1993). Наибольшее i -тое значение наблюдаемого паводка $x_{(i)}$ отмечается на графике по отношению к оцененному стоку паводка или половодья, связанному с вероятностью превышения или обеспеченностью, или по отношению к значениям вероятности q_i , присвоенным в соответствии с каждым оцененным паводком $x_{(i)}$; $x_{(1)} > x_{(2)} > \dots > x_{(n)}$. Вероятность превышения наибольшего i -того значения паводка $x_{(i)}$ можно оценить с помощью одной из нескольких формул. Три наиболее часто используемых — это формула Вейбулла $p_i = i / (n + 1)$, формула Каннена $p_i = (i - 0,40) / (n + 0,2)$ и формула Хазена $p_i = (i - 0,5) / n$. Вопросы построения графиков подробно рассмотрели Каннен (Cunnane, 1978) и Адамовски (Adamowski, 1981). Построение графиков для рядов наблюдений, содержащих историческую информацию, разработано Хиршем и Стидингером (Hirsch and Stedinger, 1987). Гидрологам необходимо помнить о том, что действительная вероятность превышения, соответствующая наибольшему наблюдению в случайной выборке, имеет среднее значение $1/(n+1)$, а среднеквадратическое отклонение — примерно $1/(n+1)$ (Stedinger and others, 1993); следовательно, построение графиков дает лишь приблизительные

оценки относительного размаха вероятностей превышения, которые могут быть связаны с наибольшими событиями (Hirsch and Stedinger, 1987).

5.6.2 **Проверка по критерию согласия**

Некоторые строгие статистические проверки полезно использовать в гидрологии для того, чтобы определить, нужно ли делать вывод о том, что данный набор наблюдений получен из конкретного семейства распределений (Stedinger and others, 1993). Тест Колмогорова-Смирнова позволяет получить границы, внутри которых должно лежать каждое наблюдение на графике распределения вероятностей, если выборка действительно получена из предполагаемого распределения (Kottogoda and Rosso, 1997). Корреляционная проверка вероятностной кривой является наиболее эффективной проверкой вне зависимости от того, получена ли выборка из предполагаемого распределения (Vogel and Kroll, 1989; Chowdhury and others, 1991). Разработанные в недавнее время L-моменты можно использовать для оценивания распределений и определения, соответствует ли предложенное распределение Гамбла, обобщенное распределение экстремальных значений или нормальное распределение имеющемуся набору данных (Hosking, 1990; Chowdhury and others, 1991). Обсуждение вопросов разработки и интерпретации графиков распределения вероятностей приведены в трудах Стидингера и др. (Stedinger and others, 1993) и Коттегора и Россо (Kottogoda and Rosso, 1997).

5.6.3 **Информационный критерий**

Для сравнения распределений паводков было предложено много подходов. Проверки по критерию согласия применяются для оценивания соответствия различных распределений вероятности описываемым рядам годовых максимумов паводков и для оценивания смоделированных выборок, получаемых при моделировании стока. Эти проверки позволяют определить, какие распределения больше всего подходят для моделирования паводков и половодий. Для оценивания качества применяемой модели Акаике (Akaike, 1974) ввел информационный критерий, который называется AIC — критерий информации Акаике. Он применим во многих разных ситуациях и состоит в минимизировании измерения информации. Критерий информации определяется в соответствии с формулой:

$$AIC(f) = -2\log L(\hat{\theta}, x) + 2k, \tag{5.31}$$

где $L(\hat{\theta}, x)$ — функция правдоподобия, а k — число параметров. По мнению Акаике (1974), модель, которая лучше всего объясняет данные, используя наименьшее число параметров, обладает самым низким критерием информации Акаике. Для выбора подходящей модели, необходимо принять некоторые компромиссы между

критерием согласия и сложностью модели. Разумеется, сам по себе критерий информации Акаике нельзя использовать для выбора подходящей модели.

Расширенная версия минимального критерия информации Акаике носит название критерия информации Байеса (BIC) и определяется как:

$$BIC(f) = -2\log L(\hat{\theta}, x) + k \log(n), \quad (5.32)$$

где $L(\hat{\theta}, x)$ — функция правдоподобия, k — число параметров и n — размер выборки. Критерий информации Байеса также является критерием экономичности. Лучшей считается модель, которая обладает самым низким значением критерия информации Байеса. Для получения критерия информации Байеса часто используется метод Шварца (Schwarz, 1978). Этот метод можно использовать для получения асимптотической аппроксимации фактора Байеса. Более того, его можно объединить с распределением априорных вероятностей, чтобы получить апостериорную вероятность для каждого распределения из данного набора распределений. Но критерий информации Байеса до сих пор широко не применялся в гидрологии. Методы, упомянутые выше, которые заслужили более широкое применение, доступны в программах HYFRAN. Озга-Зеленска и др. (Zielinska and others, 1999) разработали пакет компьютерных программ для расчета паводков, когда имеются достаточно длинные ряды наблюдений. В настоящее время существует много пакетов программного обеспечения, в том числе и те, которые указаны в ГОМС.

5.7 АНАЛИЗ ПОВТОРЯЕМОСТИ ДОЖДЕВЫХ ОСАДКОВ [ГОМС I26, K10, K15]

Данные о повторяемости ливней различной величины важны для решения разнообразных гидрологических задач. В частности, анализ повторяемости дождевых осадков широко используется для планирования и проектирования инженерных сооружений, которые контролируют ливневый сток: дамб, дренажных труб, городских и сельскохозяйственных дренажных систем. Это делается потому, что в большинстве случаев отсутствуют данные о стоке хорошего качества и продолжительности, необходимой для надежного оценивания паводков, или эти данные ограничены, а ряды наблюдений за сильными осадками имеются. Существуют две большие категории подходов к оцениванию паводков по данным об осадках: основанные на статистическом анализе данных об осадках и основанные на детерминистическом оценивании так называемых вероятных максимальных осадков. Хотя они широко используются

во всем мире, для проектирования различных больших гидравлических структур вероятные максимальные дождевые осадки не дают оценок вероятностей для работы по оцениванию риска. Таким образом, основная часть этого раздела посвящена статистическим методам оценивания дождевых осадков, с помощью которых можно получить как количественные характеристики паводков, так и соответствующие вероятностные характеристики; во второй части рассматриваются оценки экстремальных осадков. Теория и практическое применение вероятных максимальных осадков хорошо освещены в гидрологической и инженерной литературе: *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation* (Наставление по оценке вероятных максимальных осадков) (WMO-No. 332) и (NRCC, 1989); некоторые выводы представлены в разделе 5.7.5.6.

Главная цель анализа повторяемости дождевых осадков состоит в получении оценки количества осадков, выпадающих в данной точке или на данную площадь в течение определенного времени и с определенной повторяемостью. Результатом этого анализа часто является резюме в виде отношения интенсивность–продолжительность–частота для данного пункта наблюдений или создание атласа повторяемости осадков, в котором показана глубина накопления осадков для осадков различной продолжительности и с разным периодом повторяемости над рассматриваемым районом. Например, даны оценки повторяемости ливней продолжительностью от 5 минут до 10 дней и повторяемостью от 1 до 100 лет. Такие данные для США можно найти в Национальной службе погоды США и атласах Национального управления США по исследованию океанов и атмосферы (Frederick and others, 1977); для Австралии — в *Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation* (Дождевые осадки и сток в Австралии: руководство по оценке паводков) (Pilgrim, 1998); для Канады — в *Rainfall Frequency Atlas for Canada* (Атлас повторяемости дождевых осадков в Канаде) (Hogg and Carr, 1985) или в *Handbook on the Principles of Hydrology* (Учебник по основам гидрологии) (Gray, 1973) и для Соединенного Королевства — в *Flood Estimation Handbook* (Учебник по оценке паводков) (Institute of Hydrology, 1999).

В разделах 5.1–5.6 представлены основные соображения об анализе повторяемости; в разделе 5.7 рассматриваются отдельные случаи его применения для анализа дождевых осадков. Представленные в данном разделе статистические методы применимы к данным о ливневых и других кратковременных дождевых осадках. Подобные методы используются применительно к мгновенным расходам, объемам паводков, низкому стоку, засухам и прочим экстремальным явлениям. В частности, выбор типов распределения экстремальных осадков рассмотрен в публикации ВМО (1981).

5.7.1 Оценивание данных о дождевых осадках для целей анализа повторяемости

Данные о дождевых осадках, используемые при выполнении анализа повторяемости, обычно представлены в виде рядов годовых максимумов или могут быть приведены к этому виду с помощью непрерывных рядов данных о часовых и суточных дождевых осадках. В этих рядах содержится самое большое значение за весь рассматриваемый год. Альтернативный формат данных для изучения повторяемости осадков — это усеченные ряды данных, которые также относятся к значениям, превышающим пороговые, которые состоят из количеств осадков, превышающих конкретные пороговые значения для разных распределений. Разница в оценивании дождевых осадков с помощью рядов годовых максимумов и усеченных рядов оказалась особенно важной для коротких периодов повторяемости продолжительностью от двух до пяти лет и совсем незначительной для периодов повторяемости от десяти и более лет (Chow, 1964; Stedinger and others, 1993).

Для любого статистического анализа важны как качество, так и количество данных. Данные об осадках собираются в течение длительного времени. Достаточно долгий период наблюдений позволяет получить надежную основу для определения повторяемости. Известно, что выборка размера n при отсутствии априорных предположений о распределении может предоставить информацию только о вероятностях превышения большей, чем примерно $1/n$ (NRC, 1988). Это общее правило ограничения экстраполяции оценок локально определенных квантилей, выполняемой с целью определения повторяемости, двумя длинами ряда наблюдений (NRCC, 1989). Следовательно, длинные ряды наблюдений за осадками очень ценны для определения статистических оценок дождевых осадков приемлемой надежности, особенно для экстремальных дождевых осадков с периодом повторяемости больше 100 лет.

Качество данных об осадках может влиять на их применимость и правильное толкование при исследованиях по анализу повторяемости паводков. Измерения осадков подвержены как случайным, так и систематическим ошибкам (Sevruk, 1985). Случайная ошибка возможна из-за особенностей топографии и микроклиматических изменений вокруг гидрометрического створа. Случайные ошибки также вызваны недостаточной плотностью наблюдательной сети для расчета естественной пространственной изменчивости дождевых осадков. Однако систематическая ошибка считается главным источником ошибок в точечных измерениях осадков. Наибольшим компонентом систематической ошибки считаются потери, которые происходят из-за деформации поля ветра над приемным отверстием осадкомера. Другим источником

систематической ошибки являются потери воды, остающейся на стенках воронки и измерительного контейнера, на увлажнение и испарение, а также потери в виде брызг. Обсуждение систематических ошибок и введение поправок приводится в томе I, раздел 3.3.6 настоящего Руководства.

Поскольку данные о дождевых осадках собираются в фиксированные сроки, они могут не отображать истинного максимального количества осадков выбранной продолжительности. Например, изучение тысяч массивов данных о дождевых осадках, собранных на различных станциях за различные годы, показывает, что умножение годовых максимальных значений осадков, полученных в течение года по наблюдениям за часовые или суточные интервалы времени при едином фиксированном интервале времени (от 1 часа до 24 часов), на коэффициент 1,13 дает величины осадков, близкие к тем, которые получаются при анализе фактических максимумов. Меньшая корректировка требуется в том случае, когда максимальные величины определяются по данным наблюдений при двух или более фиксированных интервалах времени, как показано в таблице II.5.5 (NRCC, 1989). Таким образом, максимальные 6-часовые и 24-часовые величины, определенные по 6 и 24 последовательным 1-часовым наблюдениям, требуют введения поправочного коэффициента соответственно 1,02 и 1,01. Эти поправочные коэффициенты нужно применять к результатам анализа повторяемости рядов годовых максимумов для оценки проблемы фиксированного количества наблюдений (NRCC, 1989).

Таблица II.5.5. Поправочный коэффициент при разной частоте ежедневных наблюдений

Число наблюдений/дней	1	2	3-4	5-8	9-24	> 24
Поправочный коэффициент	1,13	1,04	1,03	1,02	1,01	1,00

Для исследований на основе анализа повторяемости необходимо проверять данные об осадках на наличие выбросов и их однородность. Как отмечалось в разделе 5.4.5, выброс — это значение наблюдений, которое сильно отличается от общего тренда остальных данных. Методы исправления выбросов требуют их рассмотрения с точки зрения математики и гидрологии (Stedinger and others, 1993). В контексте регионального анализа осадков выбросы могут дать очень важную информацию для описания верхнего (правого) хвоста распределения осадков. Следовательно, верхние выбросы рассматриваются как исторические данные, если имеется достаточное количество информации для определения того, что эти выбросы возникают не из-за ошибок измерений. Существует несколько причин неоднородности данных. Замена измерительных

инструментов или оборудования на станции может быть причиной неоднородности временных рядов осадков. Данные, полученные с осадкомерных постов, расположенных в лесах, нельзя совмещать с данными, которые получены на постах в открытой местности. Измерения, сделанные в долинах или горах на различных высотах, не дадут идентичной информации о характеристиках осадков. Поэтому нужно очень осторожно применять и всячески комбинировать данные об осадках.

5.7.2 Анализ повторяемости дождевых осадков в отдельном пункте

Анализ повторяемости можно выполнить для какого-либо наблюдательного пункта, для которого имеются достаточные данные о дождевых осадках. Как и анализ повторяемости паводков, анализ повторяемости дождевых осадков основан на рядах годовых максимумов или на усеченных рядах (например, Wang, 1991; Wilks, 1993). Доводы в поддержку каждого из этих подходов приведены в литературе (NRCC, 1989; Stedinger and others, 1993). Благодаря более простой структуре, метод, основанный на использовании рядов максимумов, более популярен. Анализ усеченных рядов, однако, более предпочтителен для коротких рядов наблюдений или для случаев с периодом повторяемости менее двух лет. Выбор подходящего метода должен зависеть от цели анализа и характеристик имеющихся данных с точки зрения их количества и качества. С помощью использования сложных и комплексных методов анализа можно добиться повышения надежности результатов. Фактически все гидрологические оценки обладают неопределенностью. По этой причине часто рекомендуется получать оценки, используя два или более независимых метода, и представлять анализ чувствительности для того, чтобы получить информацию о потенциальной надежности результатов.

Описанные ниже вкратце процедуры для определения распределения повторяемости максимумов годовых дождевых осадков в каком-то конкретном пункте включают в себя следующие шаги:

- a) получить выборку данных и оценить их качество, основываясь на гидрологических и статистических методах;
- b) выбрать потенциально подходящую модель распределения данных и оценить ее параметры;
- c) оценить пригодность выбранной модели с точки зрения возможности представления распределения генеральной совокупности, из которого были получены данные.

Оценка качества данных — важный этап во всех статистических вычислениях. Основное предположение в анализе повторяемости осадков заключается в том, что все данные независимы и распределены идентично.

Как было сказано выше, измерения осадков могут быть подвержены ошибкам по причинам, вызванным разнообразными источниками, непоследовательностью и неоднородностью. Для нахождения в ряде наблюдений неверных данных, которые появились в результате неисправности измерительного прибора и/или субъективной ошибки, требуется детальная проверка и верификация сырых, необработанных данных. Проверку независимости, стационарности и однородности в рядах данных наблюдений могут обеспечить стандартные статистические тесты (см. раздел 5.4).

Не существует общего соглашения о том, какое распределение или распределения следует использовать при анализе повторяемости осадков. Практический метод выбора подходящего распределения заключается в проверке данных с использованием кривых распределения вероятностей. Процедура построения таких кривых требует использования формулы для расчета координат точек, наносимых на график, поэтому они являются эффективным инструментом графического отображения эмпирического вероятностного распределения и оценивания соответствия исследуемого распределения имеющимся данным. На практике используется несколько формул нанесения точек на график (см. раздел 5.6 и Nguyen and others, 1989), среди которых наиболее популярными являются формулы Хагена, Вейбулла и Каннена. Различия между этими тремя формулами не являются ни большими, ни маленькими, однако разница может быть значительной при наличии в ряде данных трех-четырех больших значений (Stedinger and others, 1993). Альтернативный метод выбора подходящего распределения основан на диаграмме L-моментов (Stedinger and others, 1993).

Наиболее широко для анализа рядов годовых максимумов используются распределение Гамбла, обобщенное распределение экстремальных значений, логарифмически нормальное распределение и логарифмическое распределение Пирсона типа III. Из этих распределений в моделировании рядов максимальных годовых дождевых осадков чаще всего применяется обобщенное распределение экстремальных значений и его частный случай — распределение Гамбла. Однако было обнаружено, что распределение Гамбла занижает количество экстремальных осадков (Wilks, 1993). Кроме того, Адамовский и др. (Adamowski and others, 1996) показали, что распределение Гамбла не очень хорошо подходит для имеющихся данных об интенсивности осадков различной продолжительности в Канаде. Исследования, использующие данные о дождевых осадках в тропических и нетропических климатических регионах (Nguyen and others, 2002; Zalina and others, 2002), также подтверждают, что трехпараметрические распределения обеспечивают достаточную гибкость в представлении данных об экстремальных осадках. В частности, самым удобным было признано

обобщенное распределение экстремальных значений, поскольку оно является более простым методом оценивания параметров и более всех подходит для получения региональных оценок экстремальных дождевых осадков в пунктах наблюдений с ограниченным количеством или полным отсутствием данных (Nguyen and others, 2002). Когда периоды повторяемости, связанные с основанными на повторяемости оценками дождевых осадков, во много раз превосходят длину имеющегося ряда наблюдений, расхождения между обычно используемыми распределениями имеют обыкновение возрастать.

Многие методы оценивания параметров распределения описаны в гидрологической и статистической литературе. Самым простым из них является метод моментов, который позволяет получить оценки параметров на основе равенства теоретических и рассчитанных моментов выборки. Другой метод оценки параметров основан на расчете L-моментов выборки. Оценки, полученные в результате использования этих методов, в меньшей степени смещены, чем при использовании традиционных методов, поэтому они больше подходят для работы с маленькими выборками. Метод L-моментов доказал свою эффективность при оценке параметров обобщенного распределения экстремальных значений (Stedinger and others, 1993). Другой метод — метод наибольшего правдоподобия. Он позволяет получить оценки с хорошими статистическими свойствами при наличии больших выборок, однако соответствующих формализованных методов оценивания не существует, поэтому оценки должны вычисляться с помощью итерационных численных методов.

Надежность оценок повторяемости осадков зависит от того, насколько хорошо выбранная модель представляет распределение значений генеральной совокупности. Для того чтобы проверить, согласуется ли выбранное распределение с конкретной выборкой, используется несколько критериев согласия (NRCC, 1989; Stedinger and others, 1993; ASCE, 1996). Как отмечалось выше, графики распределения вероятностей очень полезны для оценки пригодности выбранного распределения. Оценка выполняется путем нанесения на график, построенный на специальной бумаге для построения графиков, данных наблюдений за дождевыми осадками относительно значений вероятности превышения. Оцениваемое распределение наносится на этот же график. Общее соответствие выполняется визуально. Более строгие тесты, такие как тест Колмогорова–Смирнова, корреляционный тест графика распределения вероятностей и тест на основе расчета L-моментов позволяют проверить количественно степень соответствия. Однако выбор распределения, который лучше всего подходит каждому набору данных, не рекомендуется использовать в анализе повторяемости (Stedinger and others, 1993; ASCE, 1996).

Использование самого подходящего распределения для каждой выборки позволяет получить оценки, которые очень чувствительны к изменениям данных в выборке и периода наблюдений. В настоящее время во многих странах приняты методы выбора распределения, основанные на комбинации районирования некоторых параметров и отдельно-выборочном оценивании методом Монте-Карло, что позволяет отыскивать различные комбинации методов оценивания и распределений и, таким образом, получать надежные оценки квантилей и рисков (Stedinger and others, 1993; ASCE, 1996).

5.7.3

Региональный анализ повторяемости дождевых осадков

Даже длинный ряд наблюдений может быть относительно маленькой выборкой климатического режима. Поэтому лучшее представление о режиме в районе станции может дать сглаженная карта, построенная с учетом данных с соседних станций, т. е. по расширенной выборке. Степень сглаживания должна соответствовать площади, охватываемой наблюдениями, погрешности измерений на станциях. Слишком слабое сглаживание приведет к тому, что погрешность измерения может быть принята за мнимую региональную изменчивость повторяемости осадков.

Атласы повторяемости дождевых осадков составлены с помощью интерполяции и сглаживания результатов анализа повторяемости, проведенного для отдельных пунктов наблюдений. Было показано, что региональный анализ повторяемости, который включает в себя данные, полученные в нескольких пунктах наблюдений, сокращает неопределенность оценок квантилей экстремальных явлений (Hosking and Wallis, 1988). Аналогично с региональным анализом паводков при выполнении анализов повторяемости осадков следует рассматривать вопросы отбора и верификации однородных регионов и регионального распределения параметров. Для этого было предложено несколько методов регионального оценивания, среди которых наиболее популярными являются идентификация регионального вероятностного распределения и процедура индексирования паводков для рядов годовых максимумов. Например, Счефер (Schaefer, 1990) использовал методологию индексирования паводков для регионального анализа максимального количества осадков в штате Вашингтон. Было показано, что климатически однородные регионы можно разделить по среднему годовому количеству осадков. В дальнейшем обнаружилось, что коэффициенты вариации и асимметрии максимальных годовых дождевых осадков изменяются систематически вместе со средним годовым количеством осадков. Следовательно, все пункты наблюдений внутри однородного региона можно охарактеризовать особым

трехпараметрическим распределением вероятностей, например, таким как обобщенное распределение экстремальных значений, которое имеет фиксированные значения вариации и асимметрии. Но использование среднего годового количества осадков в качестве индекса изменчивости региона не подходит для региона с различными климатическими и топографическими условиями. Например, в Соединенном Королевстве Великобритании и Северной Ирландии в качестве показателя изменчивости рекомендована медиана годового количества осадков в пункте наблюдений (Institute of Hydrology, 1999). В общем случае одна из основных трудностей применения этого метода связана с определением однородности региона. Было предложено большое количество методов определения однородности региона, но на практике ни один из них не является общепризнанным (Fernandez Mill, 1995; Nguyen and others, 2002).

Другим методом анализа повторяемости дождевых осадков является метод годостанций. Суть этого метода заключается в попытке увеличить размер выборки объединением ряда наблюдений, полученных с нескольких станций, в одну большую выборку, размерность которой совпадает с количеством годостанций. Следовательно, метод годостанций не следует использовать в том случае, если оценивается годовое количество осадков для пункта наблюдений с большей продолжительностью, чем ряд наблюдений на любой из оставшихся станций. Однако этот метод может давать более надежные оценки, если станция считается метеорологически однородной, чем при использовании данных, полученных только в одном пункте. В дальнейшем эффект корреляции данных наблюдений между различными пунктами должен быть изучен более детально, поскольку пространственная корреляция между выборками резко сокращает число годостанций. В силу последнего обстоятельства и пространственной неоднородности климатических данных этот метод редко применяется на практике.

5.7.4 **Анализ повторяемости дождевых осадков, осредненных по площади**

В общем случае для получения оценок паводков, особенно на больших дренажных бассейнах, требуется проектирование дождевых осадков, осредненных по водосбору. Например, если площадь бассейна превышает 25 км², то для проектирования дренажных систем обычно недостаточно иметь данные наблюдений за дождевыми осадками с одной станции, даже если она расположена в центре этого бассейна. Чтобы должным образом учесть пространственно-временную изменчивость дождевых осадков, следует анализировать все данные о дождевых осадках в пределах данного водосбора и на прилегающей территории. Для больших

площадей, для которых средний слой дождевых осадков значительно отличается от осадков в точке, точечные значения лучше перевести в значения, отнесенные к площади. Значения повторяемости осадков, отнесенных к площади, получаются посредством применения регионального поправочного коэффициента к значениям осадков в точке. Существует много методов перехода от точечных значений к значениям, отнесенным к площади, при использовании которых для одной и той же сети получаются различные результаты в зависимости от использованных методов (Nguyen and others, 1981; Arnell and others, 1984; Niemczynowicz, 1982; Institute of Hydrology, 1999). Оценки регионального поправочного коэффициента зависят от плотности сети осадкомерных постов и, следовательно, от точности оценок среднего количества осадков над данной территорией. Большинство способов, используемых для расчета среднего регионального количества осадков по данным осадкомеров, например метод среднего арифметического, метод многоугольников Тиссена и метод функции обратной квадрату расстояния, дают адекватные результаты для длинных периодов времени; однако разница в результатах использования различных методов сокращается как по мере уменьшения рассматриваемого интервала времени, так и суточных дождевых осадков. Для определения поправочных коэффициентов, описывающих связь между продолжительностью, площадью выпадения и слоем осадков, используется плотная сеть осадкомеров (Smith, 1993; Institute of Hydrology, 1999). Региональные поправочные коэффициенты зависят от местных климатических условий и поэтому должны быть получены на основе локальных данных при любой имеющейся возможности. Проверка правильности региональных поправочных коэффициентов требуется только в том случае, если они будут использоваться далеко от того места, где они были получены.

Поскольку методы перевода значений повторяемости точечных осадков в значения, отнесенные к площади, в большинстве случаев являются эмпирическими, были разработаны альтернативные методы прямого анализа повторяемости осадков на всей площади водосбора, основанные на использовании стохастических моделей пространственного и временного распределения дождевых осадков (Bras and Rodriguez-Iturbe, 1985; Smith, 1993).

5.7.5 **Анализ ливневых осадков для целей гидрологического проектирования**

При оценивании паводкового потенциала, выполняемого в ходе гидрологического проектирования, широко используются сведения о количестве осадков определенной продолжительности и повторяемости в данном пункте или над конкретной территорией. Использование

метода генерирования возможного количества осадков очень ценно для оценивания паводков в тех ситуациях, когда нет рядов наблюдений за паводками или имеющиеся ряды наблюдений являются недостаточно длинными для данного пункта наблюдений или они неоднородны из-за изменений характеристик водосбора, например в результате урбанизации или строительства каналов. Более того, при проектировании обычно необходима информация об очень редких гидрологических явлениях, например о событиях с периодом повторяемости более 100 лет. Общие методы анализа ливневых осадков, которые можно применить для решения этих проблем проектирования, рассматриваются ниже.

5.7.5.1 Максимальные наблюдаемые дождевые осадки

В таблице II.5.6 представлены некоторые наибольшие значения дождевых осадков различной продолжительности, которые когда-либо наблюдались в мире. Эти значения, которые представляют текущие верхние границы наблюдаемых осадков, аппроксимируются следующим приближенным уравнением:

$$P = 422T^{0,475}, \tag{5.33}$$

где P — количество осадков в миллиметрах и T — продолжительность в часах. В большинстве мест в мире

Таблица II.5.6. Самые большие в мире наблюдаемые дождевые осадки

Продолжительность	Глубина (мм)	Местоположение	Дата
1 минута	38	Барот, Остров Гваделупа	26 ноября 1970 г.
8 минут	126	Фуссен, Бавария	25 мая 1920 г.
15 минут	198	Плам-Поинт, Ямайка	12 мая 1916 г.
20 минут	206	Куртя-де-Арджеш, Румыния	7 июля 1889 г.
42 минуты	305	Холт, Миссури, США	22 июня 1947 г.
1 ч 00 мин.	401	Шангди, Неи Монгол, Китай	3 июля 1975 г.
2 ч 10 мин.	483	Рокпорт, Западная Вирджиния, США	18 июля 1889 г.
2 ч 45 мин.	559	Д'Анис, Техас, США	31 мая 1935 г.
4 ч 30 мин.	782	Сметпорт, Пенсильвания, США	18 июля 1942 г.
6 ч	840	Мудусайданг, Неи Монгол, Китай	1 августа 1977 г.
9 ч	1087	Белюв, остров Реюньон	28 февраля 1964 г.
10 ч	1400	Мудусайданг, Неи Монгол, Китай	1 августа 1977 г.
18 ч 30 мин.	1689	Белюв, остров Реюньон	28–29 февраля 1964 г.
24 ч	1825	Фок-Фок, Остров Реюньон	7–8 января 1966 г.
2 дня	2467	Орэр, остров Реюньон	7–9 апреля 1958 г.
3 дня	3130	Орэр, остров Реюньон	6–9 апреля 1958 г.
4 дня	3721	Черапунджи, Индия	12–15 сентября 1974 г.
5 дней	4301	Коммерсон, Остров Реюньон	23–27 января 1980 г.
6 дней	4653	Коммерсон, Остров Реюньон	22–27 января 1980 г.
7 дней	5003	Коммерсон, Остров Реюньон	21–27 января 1980 г.
8 дней	5286	Коммерсон, Остров Реюньон	20–27 января 1980 г.
9 дней	5692	Коммерсон, Остров Реюньон	19–27 января 1980 г.
10 дней	6028	Коммерсон, Остров Реюньон	18–27 января 1980 г.
11 дней	6299	Коммерсон, Остров Реюньон	17–27 января 1980 г.
12 дней	6401	Коммерсон, Остров Реюньон	16–27 января 1980 г.
13 дней	6422	Коммерсон, Остров Реюньон	15–27 января 1980 г.
14 дней	6432	Коммерсон, Остров Реюньон	15–28 января 1980 г.
15 дней	6433	Коммерсон, Остров Реюньон	14–28 января 1980 г.
31 день	9300	Черапунджи, Индия	1–31 июля 1861 г.
2 месяца	12767	Черапунджи, Индия	Июнь–июль 1861 г.
3 месяца	16369	Черапунджи, Индия	Май–июль 1861 г.
4 месяца	18738	Черапунджи, Индия	Апрель–июль 1861 г.
5 месяцев	20412	Черапунджи, Индия	Апрель–август 1861 г.
6 месяцев	22454	Черапунджи, Индия	Апрель–сентябрь 1861 г.
11 месяцев	22990	Черапунджи, Индия	Январь–ноябрь 1861 г.
1 год	26461	Черапунджи, Индия	Август 1860 г.–июль 1861 г.
2 года	40768	Черапунджи, Индия	1860–1861 гг.

Пересмотрено: 29 ноября 1991 г., Национальная служба погоды США, Бюро мелиорации Министерства внутренних ресурсов США, Бюро Метеорологии Австралии

количество осадков никогда не будет близким по значению к этим количествам экстремальных дождевых осадков.

5.7.5.2 Интенсивность дождевых осадков или соотношения между продолжительностью, частотой и слоем осадков

В обычной инженерной практике результатом частотного анализа точечных осадков являются соотношения, связывающие либо интенсивность, продолжительность и повторяемость, либо толщину слоя, продолжительность и частоту осадков, наблюдаемых на каждом осадкомерном посту. Эти соотношения общедоступны как в форме таблиц, так и в форме графиков для интенсивности дождевых осадков или глубины слоя в интервале от пяти минут до двух дней и с периодом повторяемости от двух до ста лет. Из-за неопределенности, связанной с экстраполяцией, количество дождевых осадков не оценивается для периодов повторяемости, которые в два раза больше, чем ряд наблюдений. Были разработаны эмпирические коэффициенты, которые выражают соотношения между интенсивностью, продолжительностью, повторяемостью и продолжительностью, повторяемостью и слоем. В технической литературе описано большое количество таких уравнений, наиболее типичными из которых являются следующие:

$$i = \frac{a}{t^c + b}, \quad (5.34)$$

$$i = \frac{aT}{t^c + b}, \quad (5.35)$$

$$i = a(t - b)^{-c}, \quad (5.36)$$

$$i = \frac{a + b \log T}{(1 + t)^c}, \quad (5.37)$$

где i — средняя интенсивность осадков, т. е. толщина слоя осадков, выпавших в единицу времени, которая обычно выражается мм/ч, t — продолжительность осадков в минутах или часах, T — период повторяемости, лет; a , b и c — параметры, меняющиеся в зависимости от расположения и периода повторяемости.

5.7.5.3 Временная и пространственная экстраполяция оценок точечных дождевых осадков

В ряде публикаций (NRCC, 1989; ASCE, 1996; Pilgrim, 1998; Institute of Hydrology, 1999) результаты анализа частоты выпадения осадков для разных периодов их повторяемости и продолжительности представлены

в виде карт. Например, Бюро погоды США опубликовало атлас дождевых осадков, который содержит карты для всей территории Соединенных Штатов с изогиетами осадков продолжительностью от 30 минут до 24 часов и периодом повторяемости от 2 до 100 лет (Hershfield, 1961). Наряду с этим атласом Национальная служба погоды США составила карты изогиет для осадков продолжительностью от 5 минут до 60 минут и периодом повторяемости 2, 10 и 100 лет для восточных и центральных штатов (Frederick, and others, 1977). Этот набор карт полезен для примерного расчета дождевых осадков короткой продолжительности или для составления соотношений между интенсивностью, продолжительностью и повторяемостью осадков.

Оценки квантилей точечных дождевых осадков продолжительностью и с периодом повторяемости, не показанными на карте, могут быть найдены при помощи интерполяции. Например, для восточных и центральных районов США слои 10- и 30-минутных осадков при заданном периоде повторяемости могут быть получены интерполяцией данных о 5-, 15- и 60-минутных осадках для того же самого периода (Frederick, and others, 1977):

$$P_{10\text{мин.}} = 0,41P_{5\text{мин.}} + 0,59P_{15\text{мин.}}, \quad (5.38)$$

$$P_{30\text{мин.}} = 0,51P_{15\text{мин.}} + 0,49P_{60\text{мин.}}. \quad (5.39)$$

Для периодов повторяемости, не равных 2 или 100 годам, используются следующие уравнения:

$$P_{\text{Тур}} = aP_{2\text{гр}} + bP_{100\text{гр}}, \quad (5.40)$$

где a и b — эмпирические коэффициенты, изменяющиеся в зависимости от значения периода повторяемости. Подчеркнем, что эти соотношения даны просто для примера. В силу региональной изменчивости применение такого соотношения должно основываться на сходстве климатических условий региона, для которого оно получено, и того региона, где оно используется.

При отсутствии пригодных для интерполяции данных об осадках за короткие промежутки времени в данной точке или поблизости режим дождевых осадков может быть оценен по имеющимся косвенным данным. К таким косвенным данным относятся среднегодовые осадки и среднее в году число дней с дождями, которые можно определить по картам или вычислить. Для территории США среднее соотношение между слоем осадков за день с осадками (среднегодовые осадки, деленные на число дней с осадками не менее 1 мм) и слоем дождевых осадков 24-часовой продолжительности и повторяемостью один раз в 2 года имеет следующий вид:

Слой осадков за день с осадками (мм)	5	8	10	13
Слой осадков 24-часовой продолжительности и повторяемостью один раз в 2 года (мм)	36	56	79	107

Еще раз подчеркнем, что приведенное в этой таблице соотношение дано просто для примера. В силу региональной изменчивости такого соотношения его применение должно основываться на сходстве климатических условий региона, для которого оно получено и того региона, где оно используется.

Для продолжительности осадков менее 24 часов рекомендуется оценивать величины дождевых осадков продолжительностью в один час на основании значений осадков 24-часовой продолжительности с последующей интерполяцией данных для промежуточных значений продолжительности и экстраполяцией для продолжительностей менее одного часа. Соотношение между осадками продолжительностью в один час и повторяемостью один раз в 2 года и 24-часовыми осадками той же повторяемости зависит от среднего годового числа дней с грозами. Исследования, охватившие широкий диапазон климатических условий, выявили следующую зависимость:

Соотношение величин 1-часовых и 24-часовых осадков повторяемостью раз в 2 года	0,2	0,3	0,4	0,5
Среднее годовое число дней с грозами	1	8	16	24

Значения дождевых осадков заданной повторяемости с продолжительностью менее одного часа часто определяют путем косвенного расчета. Данные о дождевых осадках такой короткой продолжительности редко имеются в готовом виде, удобном для составления рядов за год или более короткий промежуток времени и пригодном для непосредственного анализа повторяемости. Для оценки повторяемости дождевых осадков такой короткой продолжительности часто используют средние соотношения между количеством дождевых осадков за 5-, 10-, 15- и 30-минутные интервалы и часовыми осадками, рассчитанные по данным сотен годостанций. Эти соотношения со средней погрешностью менее 10 процентов имеют следующий вид:

Продолжительность осадков (минуты)	5	10	15	30
Отношение (<i>n</i> -минут к 60 минутам)	0,29	0,45	0,57	0,79

Таким образом, если, например, дождевые осадки продолжительностью в один час и повторяемостью один раз в 10 лет дают слой осадков, равный 70 мм, то дождевые осадки продолжительностью 15 минут и повторяемостью один раз в 10 лет дают слой осадков, равный 40 мм (т. е. 57 процентов от 70).

Следует иметь в виду, что применение этих соотношений в некоторых регионах может привести к ошибочным результатам. Например, в регионах, где большая часть дождевых осадков выпадает при грозах, эти отношения будут занижать фактические величины. С другой стороны, в регионах, где выпадение большей части дождевых осадков связано с орографическими факторами и слабо зависит от конвективной деятельности, применение этих соотношений может привести к завышенному результату. Такая изменчивость вышеуказанного соотношения была выявлена на примере территории Австралии (Court, 1961; Hershfield, 1965), где переменными величинами в соотношении являлись географическое положение и дождевые осадки продолжительностью в 1 час. Это соотношение также зависит от среднего интервала повторяемости. Если частотному анализу подвергается большое количество данных по дождевым осадкам по какому-либо региону, как, например, при подготовке обобщенных карт, составление рядов годовых данных для всех градаций продолжительности является занятием утомительным и трудоемким. Поэтому, как правило, такие ряды ограничиваются данными со сравнительно небольшого числа наблюдательных станций с надежными рядами данных наблюдений в течение, по крайней мере, десяти лет. Затем рассчитываются средние значения для годовых рядов данных, которые используются для подготовки графиков, подобно графику, представленному на рисунке II.5.1, который позволяет оценить значения ливневых осадков продолжительностью до 24 часов, если известны количества выпавших осадков за один час и 24 часа. Диагональ на рисунке II.5.2 иллюстрирует пример, в котором при 24-часовом выпадении дождевых осадков слой осадков равен 73 мм, а при ливне в один час — 22 мм. Значения осадков иной продолжительности можно снять с графика на пересечении диагонали с вертикальными линиями, характеризующими различные продолжительности. Таким образом, при 12-часовом выпадении осадков слой осадков составит 60 мм; а за два часа — 30 мм.

Графики, подобные графику, изображенному на рисунке II.5.3, можно построить с использованием интерполяции для оценки осадков с периодами повторяемости

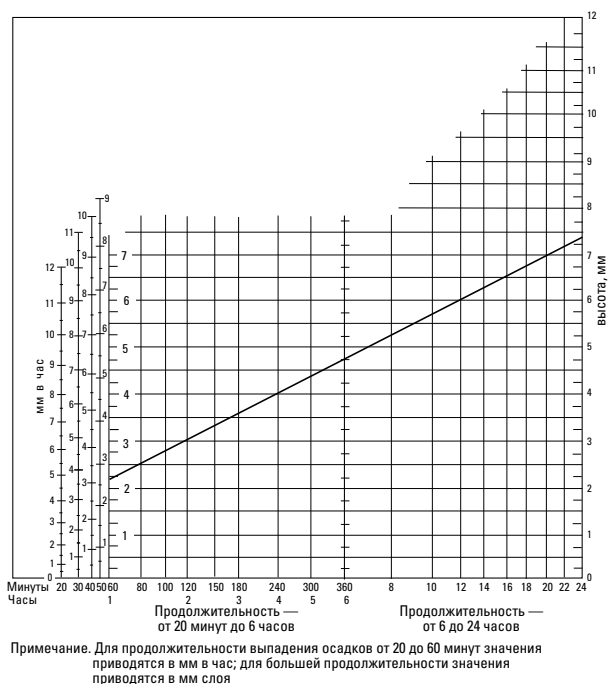


Рисунок II.5.2. Интенсивность выпадения осадков и соотношение слоя осадков и их продолжительности

от одного раза в 2 года до одного раза в 100 лет (Miller and others, 1973). Такие графики должны основываться на хороших длительных рядах наблюдений на станциях, если они считаются надежными. Подобно графикам связи слоя осадков с их продолжительностью, они меняются от одного региона к другому в случае существенных изменений климатических условий. Они используются таким же образом, как и вышеупомянутые графики, т. е. на соответствующих вертикалях проводится диагональ через слои осадков повторяемостью один раз в 2 года и один раз в 100 лет, а слои осадков другой повторяемости считываются в месте пересечения этой диагонали с соответствующей вертикалью.

При использовании вышеупомянутых двух типов интерполяционных графиков необходимо рассчитывать только часовые и 24-часовые дождевые осадки с периодом повторяемости один раз в 2 года и один раз в 100 лет для большинства станций в регионе, для которого были составлены эти графики. Затем эти графики используются для оценки других требуемых значений. Оба вида графиков подвержены региональной изменчивости, поэтому следует соблюдать осторожность при использовании этих графиков не в тех регионах, для которых они были получены.

Другой метод оценивания квантилей экстремальных дождевых осадков для мест, где данные о дождевых осадках отсутствуют, основан на использовании региональных карт статистических данных о дождевых

осадках. Например, Министерство окружающей среды Канады составило карты, показывающие изолинии среднего и среднеквадратического отклонений годовых экстремальных дождевых осадков продолжительностью от 5 минут до 24 часов для каждого региона Канады (NRCC,1989). Следовательно, если распределение Гамбла используется для описания распределения экстремальных дождевых осадков, то оценки квантилей дождевых осадков с заданным периодом повторяемости на местах, где не установлены осадкомеры, можно рассчитать с помощью метода частотных факторов и соответствующих интерполированных значений статистик экстремальных осадков. Подобным же образом в Австралии предположили, что распределение экстремальных дождевых осадков соответствует логарифмически нормальному и логарифмическому распределению Пирсона типа III, в этом случае карты региональной асимметричности наряду с имеющимися картами повторяемости дождевых осадков можно использовать для построения кривых интенсивность-повторяемость-продолжительность осадков с помощью соответствующих методов экстраполяции и интерполяции (Pilgrim, 1998).

Таким образом, главная трудность для инженеров и гидрологов заключается в получении репрезентативной информации об экстремальных дождевых осадках в заданном пункте. Станции для измерения осадков не всегда находятся в непосредственной близости к интересующей точке или для них нет рядов наблюдений достаточной продолжительности для того, чтобы получить надежные оценки дождевых осадков. Необходимо

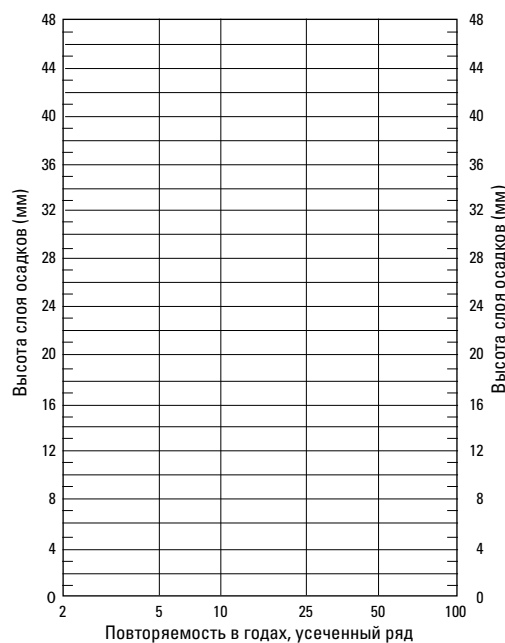


Рисунок II.5.3. Диаграмма интерполяции повторяемости

проверять карты повторяемости дождевых осадков, поскольку иногда они составлены на основе небольшого количества данных, полученных по весьма ограниченной территории, и интерполяция характеристик дождевых осадков к другим территориям может привести к серьезным погрешностям. Необходимо использовать подходящие методы анализа региональных осадков, которые описаны в разделе 5.7.3, особенно для мест, где не установлены осадкомеры, и для пунктов с ограниченным количеством данных наблюдений.

5.7.5.4 Интегральные кривые дождевых осадков

Первым шагом в изучении ливневых осадков является нанесение на график последовательно суммированных данных о дождевых осадках относительно времени суток, т. е. построение интегральной кривой для каждой станции или для ряда выбранных репрезентативных станций, если их имеется достаточно большое число. Интегральные кривые для станций, не имеющих самописцев, строятся путем сравнения с интегральными кривыми по станциям, оборудованным самописцами, при помощи коэффициентов пропорциональности. При этом следует учитывать перемещение ливня, время его начала, окончания и наибольшей интенсивности. На рисунке II.5.4 представлен типичный набор интегральных кривых для ливня, отмеченного с 31 марта по 2 апреля 1962 г. на юго-востоке Канады.

Подходящие станции заносятся в таблицу, и затем для каждой из них записываются значения аккумулярованных дождевых осадков с заранее выбранным приращением по времени. В представленном примере используются 6-часовые интервалы времени, однако с тем же успехом могут использоваться и другие интервалы. Для удобства перечень станций в таблице следует располагать в порядке уменьшения суммарной величины ливневых осадков. Следующим шагом является изучение этой таблицы и выбор 6-часового периода с максимальным приращением осадков за 6 часов. Затем

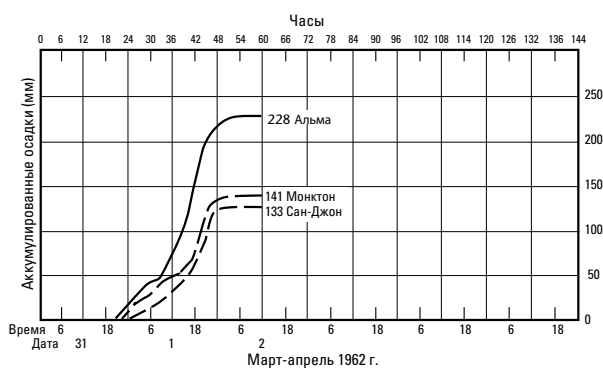


Рисунок II.5.4. Интегральные кривые осадков

за этот интервал выписываются величины осадков по другим станциям. Аналогичным образом выбирается 12-часовой интервал с максимальными дождевыми осадками и также выписываются величины осадков, выпавших в течение этого интервала. Такая же процедура применима и для 18-, 24-, . . . , и *n*-часовых интервалов максимальной интенсивности. Для периодов, охватывающих несколько 6-часовых интервалов, может потребоваться значительное число попыток для определения периода максимальных осадков заданной продолжительности.

5.7.5.5 Анализ зависимости между продолжительностью, площадью охвата и слоем дождевых осадков

Анализ ливневых осадков отражает характер зависимостей между продолжительностью, площадью выпадения и слоем дождевых осадков в течение конкретного ливня. Значения слоя осадков определяются для соответствующих сочетаний площади выпадения осадков и их продолжительности и представлены, как правило, в виде таблиц или кривых. В целом, такой анализ дает возможность получить ряды данных, полезных для проектирования сооружений по защите от наводнений, а также для исследований по численному прогнозированию осадков.

Данные наблюдений за осадками в отдельных точках анализируются в сочетании с другой информацией. Данные о дождевых осадках обычно представляют собой наблюдаемые суточные суммы осадков, дополненные наблюдениями по нескольким самописцам, которые содержат сведения об интенсивности кратковременных дождевых осадков. Иногда эти данные дополняются наблюдениями, полученными путем специального опроса, известного как «метод ведер». Дополнительную информацию можно также получить по синоптическим картам погоды, данным радиолокаторов, сведениям о подъеме уровня воды в малых реках и из других источников. Методы, которые в обобщенном виде представлены ниже, подробно изложены в публикации WMO *Manual for Depth–Area–Duration Analysis of Storm Precipitation* (Наставление по анализу слоя, площади охвата и продолжительности ливневых осадков) (WMO-No. 237).

На основе таблиц приращений максимальных дождевых осадков составляются карты изогет для каждого интервала продолжительности, например 6 или 12 часов. Затем с помощью планиметра или палетки оцениваются площади, прилегающие к каждой изогете, и полученные значения наносятся на график относительно слоя осадков, после чего для каждой продолжительности строится плавная кривая. Как правило, слой осадков выражают в линейном масштабе, а площадь — в логарифмическом. Максимальные значения продолжительности осадков, площади распространения и слоя

осадков для каждого приращения площади и продолжительности, снятые с кривых, изображенных на рисунке II.5.5., сводятся в таблицу II.5.7.

Таблица II.5.7. Максимальный средний слой атмосферных осадков (мм) — ливень с 31 марта до 2 апреля 1962, юго-восток Канады

Площадь (км ²)	Продолжительность (часы)				
	6	12	18	24	42
25	90	165	205	230	240
100	85	155	190	215	225
1 000	70	130	165	185	190
10 000	50	90	115	140	145
100 000	25	45	65	75	85

5.7.5.6 Максимально возможные осадки

Понятие «максимально возможные осадки» хорошо известно и широко применяется, когда речь идет о количестве осадков, близком к верхнему физическому пределу для заданной их продолжительности в каком-либо отдельном бассейне. Понятия «максимально возможные осадки» и «экстремальные осадки» используются приблизительно в одинаковом значении. Вопрос о том, насколько эти осадки «близки» к пределу и «возможны» — чисто риторический, поскольку определение возможного максимума есть однозначная задача, решаемая в зависимости от используемых данных.

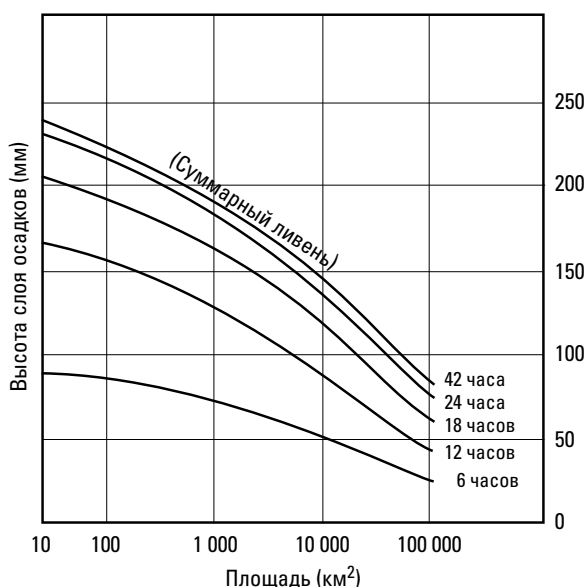


Рисунок II.5.5. Огибающие кривые соотношения высоты слоя осадков, площади их выпадения и продолжительности

5.7.5.6.1 Основные методы расчета максимально возможных осадков

Существует два метода расчета максимально возможных осадков: косвенный и прямой.

5.7.5.6.2 Косвенный метод

При использовании косвенного метода сначала оценивают максимально возможные осадки в штормовой зоне, т. е. зоне, ограниченной изогипетами, а затем преобразуют эти данные в максимально возможные осадки на рассматриваемом водосборе. Метод включает в себя следующие этапы:



Сильными ливнями называются те, для которых данные поддерживают предположение о том, что эффективность с точки зрения выпадения осадков близка к максимуму. Период повторяемости таких ливней для данной точки на огибающей кривой обычно превышает 100 лет.

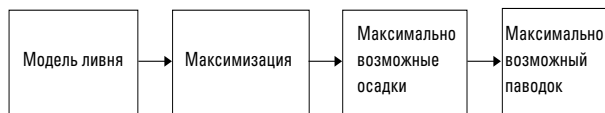
Достижение максимальной влажности — это процедура, посредством которой влажность сильного ливня достигает максимального значения. Рост обычно ограничен 20–40 процентов, потому что существует приблизительный верхний физический предел типичной точки росы, которая является критическим фактором и не может превышать наибольшую температуру воды на поверхности моря на источнике теплых и влажных воздушных масс. Кроме того, она уменьшается, поскольку она движется от источника воздушных масс к рассматриваемому водосбору.

Перенос или транспозиция — это процесс перемещения сильного ливня из одного места в другое внутри метеорологически однородной зоны. По существу, он замещает временной интервал пространством для того, чтобы увеличить число выборок и получить дополнительные данные наблюдений.

Оконтуривание представляет собой использование соотношения слой–площадь–продолжительность осадков, которое было составлено на основе перенесенных ливней, тем самым увеличивая до максимальных значений слои осадков различной площади и продолжительности. Это также компенсирует недостаточность данных наблюдений.

5.7.5.6.3 *Прямой метод*

С помощью прямого метода максимально возможные осадки для определенной площади оцениваются непосредственно, охватывая конкретный объект внутри рассматриваемого водосбора. Главные этапы включают следующее:



Применительно к типичному шторму или идеальному шторму, модели ливня отражают характеристики катастрофических осадков над рассматриваемым водосбором, которые, скорее всего, представляют наиболее значительную угрозу наводнения. Такие модели можно классифицировать в зависимости от источника на местные, транспозиционные (модели переноса), комбинационные или дедуктивные.

Локальные вероятностные модели ливней используются для максимизации местных ливней и выбираются на основе данных о ливнях, выпавших на рассматриваемом водосборе. Их можно также получить, моделируя исторически экстраординарные паводки, которые наблюдались в прошлом.

Модели переноса создаются на основе анализа перемещения фактических ливней в прилегающие сходные регионы.

Комбинационные модели описывают последовательности двух и более ливней, которые проходят процедуру пространственной или временной максимизации и объединяются в соответствии с теориями синоптической метеорологии.

Дедуктивные модели — это теоретические или физические модели, которые являются результатом аналитических умозаключений и обобщений, использующих трехмерную пространственную структуру ливневых метеорологических условий в рассматриваемом водосборе, в то время как влияющие на осадки физические факторы выражены физическими уравнениями. Они могут включать в себя модели конвергенции и ламинарные модели полей потока или ветра.

При выполнении максимизации максимизируют интенсивность ливня. Если модель описывает ливень высокой интенсивности, то максимизируют только количество влаги; в противном случае максимизируют как количество влаги, так и коэффициенты интенсивности.

Рассмотренные выше четыре метода применимы как для гористой, так и равнинной местности. Четвертый

метод в общем случае используется для площади до 4 000 км² и продолжительности менее 24 часов, а другие три метода не зависят от площади и продолжительности и особенно хорошо работают для оценивания максимально возможных осадков, выпадающих на большие водосборы (больше 50 000 км²) и продолжительностью более трех дней.

Максимально возможные осадки можно также оценивать с помощью статистического метода и метода эмпирических формул.

5.7.5.6.4 *Предварительные соображения*

При строительстве крупных гидротехнических сооружений стоимость водосливной плотины может составлять существенную часть стоимости всего проекта. Поэтому правильный расчет ее размеров чрезвычайно важен и оправдывает проведение очень детальных исследований. На предварительной стадии проектирования, однако, достаточно использовать обобщенные оценки максимально возможных осадков, если таковые имеются для данной территории. Оценки такого типа для территории США опубликованы в виде карт и графиков в различных выпусках серии гидрометеорологических докладов Бюро погоды США. Аналогичные отчеты были подготовлены и некоторыми другими странами для различных регионов мира. Для определения максимально возможных осадков необходимо выполнить следующие действия:

- a) оценка основных данных. Собрать необходимые гидрометеорологические, географические и орографические данные, особенно те, которые имеют отношение к экстраординарным ливням и паводкам, а также соответствующие метеорологические данные, и оценить их достоверность;
- b) использовать данные о ливнях в полной мере. Такие данные по рассматриваемому водосбору и окружающим его районам являются основой для расчета максимально возможных осадков и одним из главных факторов, влияющих на точность результатов;
- c) выполнить анализ характеристик и причин ливней, выпавших над рассматриваемым водосбором, с целью обеспечения основания для определения методов расчета максимально возможных осадков, выбора индикаторов, максимизации и анализа пригодности результатов;
- d) добиться полного понимания характеристик методов. На основе условий метода, требований проектирования и имеющихся данных для данного водосбора выбрать два или более метода, подходящих для определения максимально возможных осадков. Завершить расчеты отдельно по каждому методу, а затем выбрать окончательный результат на основании сравнительного оценивания.

5.7.5.6.5 **Требования к расчету максимально возможных осадков**

До тех пор пока в пределах зоны распространения ливня не произведен анализ зависимости между продолжительностью ливня, площадью охвата и слоем осадков для изучаемого бассейна, необходимо провести исследование отдельных ливней, чтобы получить оценки максимально возможных дождевых осадков. Прежде чем выполнить такие исследования, необходимо определить предельную продолжительность дождевых осадков (для конкретной проектировочной задачи). Выбор предварительной величины продолжительности дождевых осадков поможет избежать анализа данных, которые напрямую неприменимы для данного проекта, а также последующей необходимости выполнения анализа дополнительных данных, если в первом приближении было принято слишком маленькое значение продолжительности дождевых осадков.

При дедуктивном выборе приблизительной длительности дождевых осадков необходимо рассматривать время роста паводкового гидрографа в зависимости от центрирования ливня относительно различных частей водосбора, а также конкретные особенности и специфику методов, используемых при проектировании.

Выполняемые расчеты должны зависеть от характеристик ливня и проектных требований (Ministry of Water Resources and Ministry of Energy of the People's Republic of China, 1995):

- a) если проектные требования к конструкции предусматривают максимально возможные осадки конкретной продолжительности, необходимо вычислять только объем ливня и самые опасные сценарии его пространственного и временного распределения при заданной продолжительности;
- b) если проект требует определения максимально возможных осадков при различной продолжительности, они должны быть идентифицированы отдельно для каждого случая;
- c) если проект охватывает несколько участков, расположенных вдоль реки, что бывает, например, при каскадах плотин, то необходимо составить ряд оценок максимально возможных осадков, обращая внимание на координирование верхних и нижних участков. Региональные оценки максимально возможных осадков должны быть сделаны с учетом характеристик рассматриваемых ливней;
- d) для мест, где характеристики ливней различаются в зависимости от сезона, оценки максимально возможных осадков должны составляться для лета, осени, сезона дождей, тайфунов и так далее.

5.7.5.6.6 **Выбор частных водосборов**

При проектировании сооружений в створах, замыкающих крупные водосборы, может потребоваться оценивание максимально возможных дождевых осадков для некоторых водосборов притоков с последующим составлением результирующих гидрографов вероятных максимальных паводков, формирующихся на частных водосборах. Водосборы притоков, по которым требуется построение паводковых гидрографов, должны быть выбраны до начала анализа ливней, чтобы избежать последующего ненужного или неполного анализа средних по площади величин слоя дождевых осадков при изучении ливней. Выбор этих водосборов притоков производится с учетом физико-географических характеристик бассейна, а также наличия и размещения гидрометрических станций, по данным которых может быть выполнена трансформация паводковых гидрографов, полученных для водосборов притоков, в створ проектируемого сооружения.

Ниже рассмотрены три общепотребительных метода: метод транспозиции данных о ливнях, обобщенный метод оценивания и метод статистического оценивания.

5.7.5.6.7 **Метод транспозиции данных о ливне**

Главное предположение при транспозиции данных о ливне заключается в том, что район, в котором прошел ливень, и рассматриваемый район сходны по своим географическим или орографическим условиям и по синоптическим причинам возникновения ливня. В результате температура, атмосферное давление, сила ветра, пространственные и временные распределения в зоне ливня меняются незначительно. Это включает в себя следующие предположения:

- a) после транспозиции штормовая метеорологическая система и относительное положение ливневой зоны меняются незначительно;
- b) после транспозиции пространственные или временные распределения — изоэты и график хода осадков — также изменяются незначительно.

5.7.5.6.8 **Выбор транспонируемых объектов**

Для того чтобы определить основной тип катастрофических дождевых осадков и паводков на этом водосборе, сначала необходимо выполнить анализ на основе данных наблюдаемых катастрофических ливней или паводков, которые были собраны на рассматриваемом водосборе, а затем определить тип ливня, соответствующий максимально возможному паводку, характеристики которого требуются для проектирования. Например, если интересующее событие — тропический циклон (тайфун, ураган) или фронтальный ливень, то транспонируемый объект следует выбирать из ливней тропического циклона или фронтальных ливней соответственно.

5.7.5.6.9 **Возможность транспозиции**

На вопрос «насколько вероятно, что выбранное для транспонирования явление может произойти на рассматриваемом водосборе?» можно ответить:

- a) определяя метеорологически однородные зоны;
- b) устанавливая пределы транспозиции для конкретного ливня;
- c) анализируя рассматриваемый водосбор особым образом и сравнивая рассматриваемый водосбор и район возникновения ливня с точки зрения климата, погоды, географии, орографии и т. п. Чем больше они похожи, тем возможнее эффективная транспозиция.

5.7.5.6.10 **Локализация карты изогие**

Процедура локализации карты изогие подразумевает перемещение карты изогие транспонированного объекта на рассматриваемый водосбор. При этом возникают вопросы о том, где поместить центр шторма, повернуть ли направление оси зоны ливня — направление главной оси карты изогие — и как его повернуть.

Вычисления начинаются с изучения статистических данных о пространственном распределении фактических ливней, т. е. нахождения общих правил центральных положений и направлений осей ливней со схожими к транспонируемому объекту погодными условиями, на основании существующих данных о ливнях, включая данные наблюдаемые, измеренные и зафиксированные в литературе. Затем данные уточняются, и принимаются решения в соответствии с конкретными особенностями проекта.

Транспонированные изогие должны максимально соответствовать крупномасштабной орографии рассматриваемого водосбора. Центр ливня должен соответствовать элементам мелкомасштабной орографии, например, местности, окружающей русло реки.

5.7.5.6.11 **Корректировка транспозиции**

Цель корректировки транспозиции состоит в получении оценок количественных изменений дождевых осадков, вызванных разницей в геометрических, географических и орографических условиях района. Другими словами обычно корректировка транспозиции заключается во введении геометрических, географических и орографических поправок для водосбора. Географическая корректировка подразумевает только корректировку индекса увлажнения, орографическая — корректировку индекса увлажнения и интенсивности осадков. Геометрическую корректировку следует выполнять в первую очередь для любой транспозиции ливня.

Если транспонируемый объект в значительной степени сходен с рассматриваемым водосбором по метеорологическим условиям, а орографические и географические условия практически одинаковы, и между ними нет явной разницы в индексе увлажнения, то изогие транспонируемого объекта можно перенести на рассматриваемый водосбор без изменений, требуется только геометрическая корректировка водосбора.

Если два водосбора похожи по метеорологическим условиям и различны по орографическим и географическим условиям, и эти различия недостаточно велики для того, чтобы вызывать большие изменения в механизме выпадения осадков, то корректировка интенсивности дождевых осадков не требуется. В этом случае вместе с геометрической корректировкой требуется и корректировка индекса увлажнения водосбора. Этот метод широко применяется на равнинах и в регионах с низким рельефом.

Если по объективным причинам необходимо транспонировать ливни с различными орографическими условиями, то нужно учитывать влияние гор на механизм выпадения осадков. В таких случаях, наряду с геометрической поправкой и поправкой к индексу увлажнения водосбора, требуется введение орографической поправки.

Необходимость учета структуры распределения осадков относительно ориентации бассейна привела к проведению специальных исследований (WMO, 1986a; Hansen and others, 1982).

5.7.5.6.12 **Максимизация ливней**

Для транспозиции ливней обычно выбирают типичные сильные ливни, поэтому при их максимизации требуется только максимизация индекса увлажнения. В таких случаях максимизацию можно представить в источнике ливня только перед транспозицией. Только после корректировки транспозиции они станут максимально возможными ливневыми осадками.

Методы максимизации, разработанные в США и принятые в ряде стран (Pilgrim, 1998), описаны Вейснером (Weisner, 1970) и в ряде публикаций Национальной службы погоды США, бывшего Бюро погоды США (см. ссылки в *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation* (Наставление по оцениванию максимально возможных осадков) (WMO-№. 332, 1986a).

5.7.5.6.13 **Обобщенный метод оценивания**

Этот метод включает в себя оценивание максимально возможных осадков для неорографических и орографических районов. Предполагается, что осадки в неорографических районах обуславливаются прохождением

над районом метеорологических систем, в то время как в орографических районах — и прохождением метеорологических систем, и орографическими эффектами. Осадки, вызванные метеорологическими системами, называются конвергентным дождем или конвергентными компонентами, а вызванные орографией — орографическими дождями или компонентами.

Концептуальное описание осадков включает в себя описание конвергентных дождей, включая описание слоя, площади и продолжительности ливней. Этот метод применяется как для конкретного водосбора, так и для большого региона, включающего в себя несколько водосборов различной площади. В последнем случае описание называется общим или региональным оценением. Суть концептуального описания заключается в обобщении соотношений слой-площадь-продолжительность и пространственно-временных распределений максимально возможных осадков.

Определение максимально возможных осадков с помощью обобщенного метода оценивания соотношений слоя, площади и продолжительности осадков состоит из четырех этапов:

- a) максимизация сильных фактических ливней — в большинстве случаев выполняется только максимизация индекса увлажнения;
- b) транспонирование максимизированных ливней на изучаемый район;
- c) сглаживание огибающих кривых и их сопоставление с данными, включая сглаживание соотношений слоя и продолжительности, слоя и площади и комбинированное сглаживание слоя, площади и продолжительности;
- d) применение максимально возможных в районе шторма дождевых осадков к рассматриваемому водосбору, с тем чтобы определить максимально возможный на данном водосборе ливень.

Для регионального обобщенного оценивания после пункта (с) должно следовать региональное сглаживание. Приемы проверки на региональную однородность, включающие различные сопоставления, описаны Хансеном и др. (Hansen and others, 1977) и в *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation* (Наставление по оцениванию максимально возможных осадков) (WMO-No. 332).

Этот метод используется для оценивания максимально возможных осадков продолжительностью от 6 до 72 часов и площадью до 52 000 км² на равнинах и до 13 000 км² в орографических районах США. Для оценивания максимально возможных осадков в орографических районах необходимо учитывать влияние топографии. Для других стран или районов необходимо

проанализировать величину площади, для которой может быть применен этот метод, основываясь на фактических местных условиях.

Этот метод в полной мере использует максимумы, включая наибольшие дождевые осадки в условиях различной продолжительности и площади выпадения, из всех данных о ливнях в рассматриваемом регионе. Результаты этих вычислений могут быть приведены в соответствие в заданном районе и регулируемом водосборе.

Широко используемый в настоящее время в Австралии, Индии, США и других странах обобщенный метод оценки описан в *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation* (Наставление по оцениванию максимально возможных осадков) (WMO-No. 332).

Главные результаты использования обобщенного метода оценивания заключаются в следующем:

- a) для слоя максимально возможных осадков: один — карта огибающих кривых соотношения между слоем, площадью и продолжительностью возможных максимальных осадков, другой — карта изолиний максимально возможных осадков для нескольких значений продолжительности и площади выпадения осадков;
- b) для пространственного распределения максимально возможных осадков: обобщено в виде набора концентрических, похожих эллипсов;
- c) для временного распределения максимально возможных осадков: обобщено в виде единичного пика;
- d) для орографических районов также существуют коррелограммы или карты изолиний некоторых параметров, отражающих результаты орографического воздействия, которые используются для перевода максимально возможных осадков в виде конвергентных дождей в максимально возможные осадки в орографических районах.

5.7.5.6.14 Метод статистического оценивания

Это приближенный метод оценивания максимально возможных осадков для маленьких водосборов площадью до 1 000 км². Он описывается ниже.

В общем случае максимально возможные осадки для небольшого водосбора можно определить с помощью метода транспозиции ливня. Тем не менее, когда для рассматриваемого района данных о влажности и ветре недостаточно для максимизации, этот метод использовать очень трудно. Если вместо ливневых осадков транспонируется непосредственно абстрактная статистическая величина K_m , решение задачи упрощается. Значение K_m можно определить по формуле:

$$K_m = \frac{X_m - \bar{X}_{n-1}}{S_{n-1}}, \tag{5.41}$$

где X_m — первый член в упорядоченном m -ряде наблюдений, т. е. имеющий очень большое значение,

\bar{X}_{n-1} — среднее, за исключением очень большого значения, т. е.:

$$\bar{X}_{n-1} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n X_i, \tag{5.42}$$

S_{n-1} — среднее квадратическое отклонение, за исключением очень большого значения, т. е.:

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=2}^n (X_i - \bar{X}_{n-1})^2}. \tag{5.43}$$

Очевидно, что чем больше данных используется и чем больше рассматривается районов, тем значение K_m будет ближе к значению, соответствующему максимально возможным осадкам.

Хершфилд (Hershfield, 1965) собрал данные с более чем 2 600 осадкомерных станций, около 90 % которых находятся в США, и получил графическое соотношение между сглаженными значениями и средними значениями годовых рядов K_m разной продолжительности (рисунок II.5.6) для гидрологических целей.

При использовании рисунка II.5.6 для определения K_m можно получить средние значения \bar{X}_n и S_n на основе данных о дождевых осадках на конкретной станции в рассматриваемом водосборе. Вычисления совершаются в соответствии со следующим уравнением:

$$PMP = \bar{X}_n + K_m S_n. \tag{5.44}$$

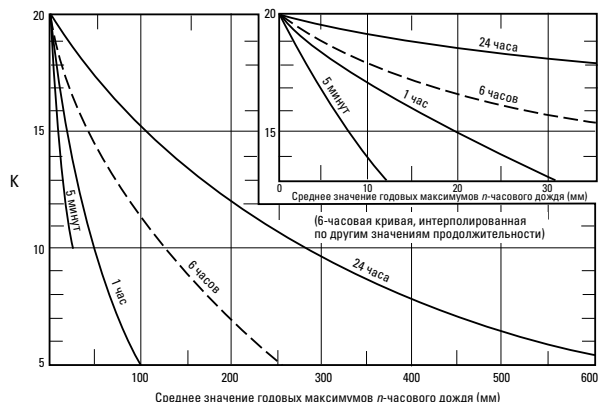


Рисунок II.5.6. К как функция продолжительности дождевых осадков и среднегодового значения ряда

Коэффициент изменчивости:

$$C_{vn} = \frac{S_n}{\bar{X}_n}. \tag{5.45}$$

Следовательно, уравнение (5.39) можно переписать в виде:

$$PMP = (1 + K_m C_{vn}) \bar{X}_n. \tag{5.46}$$

Как видно из уравнения (5.46), определение максимально возможных осадков по методу статистического оценивания Хершфилда заключается в транспонировании статистической величины K_m очень сильного ливня в обширном районе и ее корректировке с использованием среднего значения \bar{X}_n и коэффициента изменчивости C_{vn} для рассматриваемого водосбора. Метод требует, чтобы для рассматриваемого водосбора имелись ряды достаточных данных о ежедневных осадках, полученных на одной станции.

Необходимые максимальные дождевые осадки выбираются из записей по критерию конкретной продолжительности или продолжительностей (1 час, 6 часов, 24 часа) для каждого года и выстраиваются в годовые ряды. Затем для рядов данных рассчитываются среднее \bar{X} и среднее квадратическое отклонение S_n или коэффициент C_{vn} . Значение K определяется с помощью графика II.5.6 по среднему значению ряда. В результате максимально возможные осадки можно найти с помощью уравнения (5.44) или (5.46).

Следует обратить внимание на то, чтобы одна или две максимальные величины в ряду годовых величин были сопоставимы с другими входящими в ряд величинами. Если, например, максимальная величина за 30-летний период вдвое превосходит вторую наивысшую величину, то она явно не соответствует данному ряду и является «выбросом». Простейшим способом выявления «выбросов» является ранжирование ряда в убывающем порядке с последующим вычислением периода повторяемости каждого значения. Затем все значения наносятся на клетчатку вероятностей относительно периодов их повторяемости, как показано на рисунке II.5.7. Если максимальное значение ряда лежит намного выше линии, соответствующей другим членам ряда, такую величину следует рассматривать в качестве «выброса». При расчете среднего значения ряда или стандартного отклонения она отбрасывается. Если же ее использовать, то в среднее значение и стандартное отклонение должны быть введены поправки, как это предлагает Хершфилд, который также разработал способ удлинения рядов. В главе 4 в *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation* (Наставление по оцениванию максимально возможных осадков) (WMO-№. 332) дается исчерпывающее, подробное описание всей методики, включая графики для получения необходимых поправок).

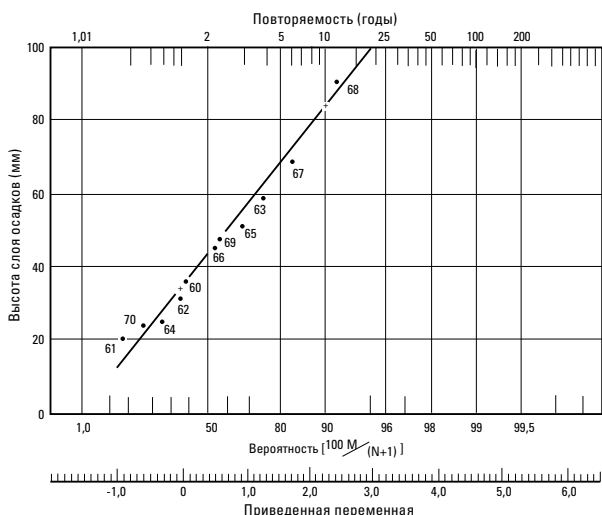


Рисунок II.5.7. Пример экстремального графика плотности распределения

Когда полученное значение максимально возможных осадков необходимо использовать для площади более 25 км², его следует уменьшить. Для меньших размеров площадей в этом нет необходимости. Для больших площадей точечные значения осадков обычно уменьшают, пользуясь кривыми зависимости слоя осадков от площади их выпадения или кривыми редукции осадков по площади, аналогичными кривым на рисунке II.5.8.

Описанный выше статистический метод может привести к завышению максимально возможных осадков в районах с сильными ливнями и в районах, где часто повторяются ливни схожего характера. В регионах с незначительными дождевыми осадками и в регионах, где возможны, хотя и редкие, но все же сильные штормы, порождающие выпадение сильных дождей, такие как тропические циклоны, этот метод может привести к занижению максимально возможных осадков. Было установлено, что для того чтобы получить более высокие значения максимальных осадков для некоторых районов по сравнению с определенными на основании точечных наблюдений, значения коэффициента К должны равняться 30. В США и ряде других стран, где для определения максимально возможных осадков используются, как правило, данные наблюдений за ливнями, статистический метод применяется, главным образом, как средство проверки однородности.

5.7.5.6.15 Проверка правдоподобности оценок максимально возможных осадков

Теоретически для оценивания максимально возможных осадков должны использоваться параллельно несколько методов. Полученные результаты затем необходимо полностью проанализировать и выбрать

лучшее значение максимально возможных осадков. В конце необходимо проверить правдоподобность выбранного максимально возможного количества осадков с различных позиций для того, чтобы результат был и максимальным, и возможным. Вообще методы проверки правдоподобности результатов оценок максимально возможных осадков такие же, как и для проверки максимально возможных паводков. Следовательно, методы их проверки являются одинаковыми (см. раздел 5.10.2 или *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation* (Наставление по оцениванию максимально возможных осадков) (WMO-No. 332), глава 4.

5.7.5.7 Расчетный ливень

Расчетный ливень или расчетная кривая распределения дождевых осадков — это временной ход дождевых осадков, который определен для использования при проектировании гидротехнического сооружения. Расчетную кривую распределения осадков или искусственный ливень особой вероятности превышения можно получить следующим образом. Слой осадков выводится из соотношения слоя, продолжительности и повторяемости на основании известной вероятности и продолжительности. Затем к слою дождевых осадков применяется поправочный коэффициент для площади. Наконец, имеющимися методами определяется распределение слоя дождевых осадков во времени (Wenzel, 1982; Arnell and others, 1984). Пилгрим и Кордери (Pilgrim and Cordery, 1975) предупредили, что подходы, сглаживающие временной ход дождевых осадков, не могут использоваться, поскольку изменчивость осадков во времени часто оказывает значительное влияние на расчетную кривую распределения осадков. Пилгрим и Кордери (Pilgrim and Cordery, 1975) и Хафф и Ченгнон (Huff and Changnon, 1964) отметили, что изменчивость интенсивности сокращается с уменьшением вероятности

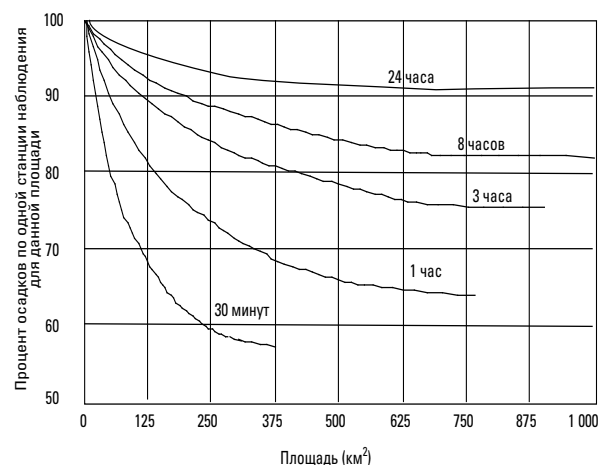


Рисунок II.5.8. Кривые связи слоя и площади выпадения осадков

превышения, и большинство экстремальных ливней имеют несколько пиков высокой интенсивности. Соотношения слоя, продолжительности и повторяемости можно районировать с помощью методов, описанных выше.

5.7.5.8 Засуха

Засуха представляет собой экстремальное гидрологическое явление, когда в результате нарушения гидрологического цикла в течение довольно длительного периода времени наблюдается дефицит воды. Местных водных ресурсов при этом не хватает для поддержания сложившейся или нормальной жизнедеятельности региона. Засухи рассматриваются и классифицируются как метеорологические, гидрологические или сельскохозяйственные. Метеоролог рассматривает засуху как период с осадками ниже нормы. Для гидролога засуха означает пониженное (ниже среднего) содержание воды в реках, водохранилищах, озерах, котловинах, водоносных слоях и в почве. Для агронома засуха означает длительный недостаток воды в корнеобитаемой зоне.

Применительно к метеорологической засухе анализируется повторяемость засушливого периода. Простейшим видом анализа является сравнение суммарных дождевых осадков за календарные месяцы или соответствующие сезоны с нормой для возможной оценки суровости засухи, определенной по отрицательным отклонениям от нормы. Чтобы учесть эффект распределения дождевых осадков во времени, вместо суммы дождевых осадков можно использовать индекс предшествующего увлажнения. Другим способом учета воздействия переходящего месяца за месяцем запаса влаги от дождевых осадков для оценки суровости метеорологической засухи является метод Хербста (Herbst and others, 1966).

О суровости сельскохозяйственной засухи можно судить по индексу засушливости, предложенному для обобщения и периодического распространения информации о засухе и условиях увлажнения сельскохозяйственных культур на региональной основе. Он может использоваться для оценки опасности засухи на значительной территории или для периодической оценки текущего состояния или степени суровости засухи в регионе.

Суровость гидрологической засухи определяется степенью отклонения от нормы низкого стока и почвенной влаги в сочетании с сильным понижением уровня подземных вод. Вследствие значительного временного запаздывания между проявлениями отклонений в осадках и в точке, в которой этот дефицит воды становится очевидным на поверхности воды и в грунтовых водах, гидрологическая засуха проявляется позже дефицита осадков, поскольку она обычно определяется

отклонением в запасах поверхностных и подземных вод от некоторых средних условий в различных точках со временем.

5.7.5.9 Современные методы анализа повторяемости осадков

Плотность осадкомерных постов всегда была серьезным ограничением в развитии методов анализа повторяемости осадков. Метеорологические радары являются потенциально важным источником данных для анализа повторяемости. Самое главное их преимущество в измерении осадков заключается в том, что радары покрывают большую площадь с хорошим пространственным и временным разрешением минимум 1 км² и 5 минут. Один радар с эффективным радиусом действия 200 км может охватывать наблюдениями площадь более 10 000 км².

Клаки и др. (Cluckie and others, 1987) рассматривают анализ слоя, площади и продолжительности экстремальных явлений с помощью суммарных почасовых осадков, зафиксированных радаром на сетке координат с квадратом 5 км. Особое внимание уделяется необходимости корректировки и калибровки полученных данных. Анализ слоя, площади и продолжительности представлен на примере характерных ливней в качестве средства классификации ливней в зависимости от их способности формировать паводки. Более того, Клаки и Пессоа (Cluckie and Pessoa, 1990) использовали радиолокационные данные по северо-западному региону Англии для характеристики фактических ливней, которые потом были максимизированы и транспонированы для получения оценок максимально возможных осадков на интересующем водосборе (см. раздел 5.7.5.6, где рассматриваются максимально возможные осадки). Такой подход реализуется за счет способности радиолокаторов изображать ливни во времени и пространстве. Программа, называемая РАДМАКС, выполняет процедуру и объединяет этап визуализации ливня (Moore, 1993). Кольер (Collier, 1993) предложил использовать радиолокационные и спутниковые данные для получения приближенных оценок, позволяющих уточнить оценки максимально возможных осадков, получаемых при помощи модели ливня.

Решение задач, связанных с проектированием гидротехнических сооружений, обычно требует информации об очень редких гидрологических явлениях, период повторяемости которых значительно превышает 100 лет. Традиционные методы решения этих проблем в большинстве случаев основаны на использовании максимально возможных осадков. Новые методы анализа повторяемости, которые используют некоторые инструменты оценивания максимально возможных осадков, были разработаны для оценивания количества дождевых осадков с очень большими периодами

повторяемости. В частности, Национальный исследовательский совет (National Research Council, 1988) рекомендовал стохастические методы транспозиции ливня. В применении максимально возможных осадков транспозиция ливня основана на предположении, что существуют метеорологически однородные регионы, такие, в которых отмечающиеся где-то сильные ливни могут случаться где-нибудь еще в этом регионе, с оговоркой, что возможны различия в среднем слое выпавших дождевых осадков, возникающие из-за разности потенциалов индекса увлажнения. При использовании стохастического метода транспозиции ливня частота повторяемости ливней в транспонируемом регионе связана с получаемыми оценками повторяемости параметров экстремальных ливней. Стохастический метод транспозиции ливня позволяет получить оценки годовой вероятности превышения среднего слоя выпавших дождевых осадков в рассматриваемом водосборе. Оценка основана на региональных характеристиках ливня, например максимальном слое осадков в эпицентре, параметрах модели ливня, ориентации ливня, силы ливня и его пространственной изменчивости, а также на оценках распределения суммарной вероятности ливневых характеристик и повторяемости ливней в пределах рассматриваемого региона. Преимущество этого метода заключается в том, что он непосредственно рассматривает морфологию ливней, включая пространственное распределение изменчивости силы ливня и его соотношение с размером и формой рассматриваемого водосбора (National Research Council, 1988).

5.8 АНАЛИЗ МЕЖЕННОГО СТОКА [ГОМС I80, K10]

5.8.1 Общие положения

Информация о характеристиках меженного стока ручьев и рек важна для планирования, проектирования и управления гидрологическими проектами и водоресурсными системами. Такая информация используется при проектировании сооружений по очистке сточных вод и хранению запасов воды, для того чтобы убедиться, что выбросы не превышают ассимилирующую способность принимающих водотоков; при проектировании водохранилищ для многоцелевых систем и для распределения воды для различных промышленных, сельскохозяйственных, бытовых и экологических нужд.

В этом разделе будут подробно описаны анализ повторяемости меженного стока и построение кривых обеспеченности — два основных метода, используемых при оценивании характеристик меженного стока водотоков. Для использования обоих подходов обычно требуются продолжительные ряды наблюдений за стоком,

полученные на гидрометрическом посту (кроме тех случаев, когда для оценивания характеристик поста применяются региональные методы). Другие характеристики, которые иногда полезны, включают в себя продолжительность или повторяемость состояния меженного стока, когда сток в течение сезона может быть ниже предельных значений, а объем воды или её дефицит может возрасти в течение периода, когда сток ниже предельных значений. Статистические подходы можно также использовать для оценивания этих характеристик. Другие подходы, например исторические последовательности или искусственно созданные последовательности данных, проходящие через модель реки или водохранилища, могут давать дополнительную ценную и подробную информацию для расчетных целей. Последний из названных подходов не будет рассматриваться в настоящем Руководстве.

Меженный сток обычно поддерживается за счет истощения запасов подземных вод или поверхностным стоком из водных объектов, расположенных выше по течению, таких как озера, болота и ледники. Периоды низкого стока в течение года или сезона могут обуславливаться различными механизмами, вызывающими гидрологический отклик. В холодном северном климате низкий сток может определяться продолжительным зимним периодом, в течение которого осадки выпадают преимущественно в виде снега, в результате чего происходит даже уменьшение стока до начала весеннего половодья. Второй период, когда отмечается межень, это теплый сезон, в течение которого наблюдаются периоды сильного испарения и незначительных осадков. В зависимости от местных климатических и физико-географических условий в некоторых бассейнах низкий сток формируется в результате преобладания одного процесса или комбинации процессов, как описано выше (Waylen and Woo, 1987). Важно понимать процессы, обуславливающие меженный сток, поскольку они могут определять аналитические подходы, применяемые для анализа их характеристик и результатов.

Антропогенное вмешательство может сильно влиять на естественный режим меженного стока. Например, увеличение использования поверхностных вод для орошения в периоды продолжительного отсутствия дождевых осадков приводит к искусственному сокращению величины стока по сравнению с тем, который должен был быть в естественных условиях. Значительное изъятие грунтовых вод для сельскохозяйственных, промышленных и бытовых потребностей людей может понизить уровень воды в водоемах и привести к уменьшению стока. Ряд других антропогенных факторов, влияние которых может проявиться на водосборе, должен быть известен до начала анализа данных. Такими факторами могут быть регулирование стока, межбассейновое перераспределение стока, возврат сточных вод из канализационных систем, которые используют

грунтовые воды как источник воды, а также изменения в землепользовании, такие как вырубка и восстановление леса или урбанизация. Эти факторы могут привести к уменьшению или увеличению скорости стекания воды (Institute of Hydrology, 1980; Smakhtin, 2001) и могут свести на нет все предположения, обычно связанные с аналитическими инструментами, описанными ниже и в предыдущих разделах этой главы.

5.8.2 Анализ повторяемости низкого стока для отдельного поста

Информация о повторяемости низкого стока может быть получена из анализа, относящегося к вероятности превышения параметров определенного явления. Такие соотношения можно установить для периодов низкого стока различной продолжительности в 1, 3, 7, 14 дней или для других периодов или рассматриваемой продолжительности. В общем случае непараметрический анализ повторяемости или вероятностное распределение используется для описания отношения повторяемости рассматриваемого сезонного или годового межennaleго стока. Так же, как и в случае паводкового стока, теоретическое распределение низкого стока неизвестно.

Для выяснения того, какие распределения и какие методы оценок параметров могут лучше представлять распределение низкого стока, было предпринято много исследований (см., например Nathan and McMahon, 1990; Lawal and Watt, 1996; и Durrans and Tomic, 2001). Результаты этих исследований различаются, поскольку не всегда используются одни и те же распределения, методы их «подгонки» и данные.

Маталас (Matalas, 1963) проанализировал данные для 34 постов в США с помощью распределения Пирсона типа III (P3), распределения Пирсона типа V (P5), распределения Гамбла типа III (G3), которое также известно как трехпараметрическое распределение Вейбулла (W3), и трехпараметрического лог-нормального распределения (LN3). Он пришел к выводу, что распределения Гамбла и Пирсона типа III одинаково эффективны и превосходят два других распределения. В соответствии с выводами Маталаса теоретическое вероятностное распределение должно иметь нижнюю границу большую или равную нулю. Он использовал это предположение в качестве критерия в оценке приемлемости распределения. Конди и Никс (Condie and Nix, 1975) выполнили подобный анализ по данным с 38 канадских рек, используя те же самые распределения, что и Маталас (Matalas, 1963). Для того чтобы выяснить, насколько подходят эти распределения, они рассмотрели решения, в которых параметр нижней границы был больше нуля, но меньше, чем наименьшее наблюдаемое значение стока. Они рекомендовали использовать распределение Гамбла типа III с параметрами, оцененными методом наибольшего правдоподобия, придерживаясь

метода наименьшей наблюдаемой засухи. Конди и Ченг (Condie and Cheng, 1982), продолжая исследования Конди и Никса (1975), также рекомендовали использовать распределение Гамбла типа III для анализа повторяемости низкого стока. В последнем исследовании они рассмотрели условия с отрицательной нижней границей. В таких случаях они взяли область функции плотности в промежутке от нижней границы до нуля для представления вероятности появления нулевых значений стока. Они также проверили, чтобы параметр нижней границы не был больше наименьшего члена выборки, поскольку определенные методы «подгонки» распределений могут давать неправдоподобные результаты.

Таскер (Tasker, 1987) показал с помощью процедуры бутстреппинга, или самонастройки, для 20 станций, расположенных в штате Виржиния (США), что логарифмическое распределение Пирсона типа III и распределение Гамбла типа III имеют меньшие среднеквадратические ошибки в оценках 7-дневных по продолжительности 10-летних по повторяемости (Q7,10) и 7-дневных 20-летних (Q7,20) межennaleго стока, которые были получены с помощью преобразований Бокса-Кокса или логарифмических методов Бутона. Вогель и Кролл (Vogel and Kroll, 1989) проанализировали двухпараметрическое лог-нормальное распределение (LN2) и двухпараметрическое распределение Вейбулла (W2) применительно к данным, полученным на 23 постах в штате Массачусетс, США. Они пришли к выводу, что двухпараметрическое распределение Вейбулла подходит плохо, поскольку нет оснований отвергать гипотезу о том, что данные взяты из двухпараметрического логарифмически нормального распределения. Кроме того, они проанализировали различные трехпараметрические распределения, а именно LN3, LP3 и G3. Они обнаружили, что LP3 незначительно превосходит другие трех- и двухпараметрические распределения. Эти исследования показали, что выбор распределения повторяемости зависит от района и не существует распределения, явно превосходящего все другие.

Зайдман и др. (Zaidman and others, 2003) выполнили анализ данных по 25 естественным потокам в Соединенном Королевстве, наблюдения за которыми проводятся более 30 лет. Они получили временные ряды данных для продолжительностей 1, 7, 30, 60, 90 и 365 дней для каждого из бассейнов. После этого четыре трехпараметрических распределения, а именно: обобщенное логистическое распределение (GL), распределение Пирсона типа III (P3) и обобщенное распределение Парето, использовались для описания данных для каждого из рядов и для каждой продолжительности. Для того, чтобы различить результаты, использовались критерии согласованности и здравый смысл. В итоге были сделаны следующие выводы:

- a) рассмотренные распределения очень хорошо соответствуют данным наблюдений с небольшими количественными различиями между ними;
- b) некоторые распределения представляются более эффективными, чем другие, в зависимости от длительности меженных периодов и характеристик водосбора;
- c) индекс подземного питания (Institute of Hydrology, 1980) очень полезен для количественного представления геологических особенностей водосбора;
- d) для менее водопроницаемых бассейнов распределение Пирсона типа III дает самые лучшие результаты для меженных периодов короткой продолжительности, однако обобщенное распределение экстремальных значений превосходит распределение Пирсона типа III для рядов с большей продолжительностью межени;
- e) для более водопроницаемых бассейнов наилучшие результаты дает обобщенное логистическое распределение.

Неоднократно было обнаружено (Nathan and McMahon, 1990; Durrans and Tomic, 2001), что самый большой сток в ряду минимумов часто описывается более эффективно гораздо более крутой интегральной кривой распределения, чем той, которая бы описывала последовательные меженные периоды. В качестве реакции на это наблюдение были разработаны методы, в соответствии с которыми подбираются распределения только для нижней части или хвоста распределения, а не для целой выборки. Натан и Макмэн (Nathan and McMahon, 1990) отметили, что переход происходит там, где «величины стока большей повторяемости более не рассматриваются» как периоды меженного стока, но представляют более «нормальные условия». Для компенсации неоднородности выборки были предложены такие подходы, как корректировка условной вероятности (Condie and Cheng, 1982; Nathan and McMahon, 1990), применение теории цензурирования (Kroll and Stedinger, 1996), смешанные или составные параметрические модели (Waylen and Woo, 1987) и непараметрические подходы повторяемости (Adamowski, 1996; Guo and others, 1996). Эти подходы можно использовать для анализа выборки, если в ней содержатся нулевые значения.

Дэрранс и Томич (Durrans and Tomic, 2001) изучили применимость некоторого числа методов, в которых внимание сфокусировано только на выборе хвостов распределений. Они пришли к выводу, что различные методы описывают хвосты «так же, если не лучше, чем стратегия оценки, включающая подгонку распределения» полного набора данных при помощи логарифмически нормального распределения на основе L-моментов. В противоположность этому методу для районов, где годовые и сезонные ряды низкого стока могут быть обусловлены более чем одним фактором, если эти

факторы можно идентифицировать, более правдоподобное описание данных должны обеспечивать смешанные или составные параметрические модели. В качестве альтернативы можно использовать метод непараметрического оценивания повторяемости, как предложили Адамовски (Adamowski, 1996) и Гуо и др. (Guo and others, 1996). Более того, было показано, что методы непараметрического оценивания квантилей меженного стока дают такие же точные или даже более точные результаты, чем полученные более традиционными параметрическими методами, а именно при помощи логарифмического распределения Пирсона типа III, а также двухпараметрического и трехпараметрического распределения Вейбулла, основанных на экспериментах по моделированию однородных выборок.

Статистические данные низкого стока обычно рассчитываются для периодов или продолжительностей заданной длительности: 1, 3, 7, 14, 30, 60, 90, 120, 183 и 365 дней. Данные о низком стоке различной продолжительности рассчитываются с помощью скользящего среднего значения для рассматриваемого периода. Скользящее среднее значение — это наименьшее среднее арифметическое значение стока за d последовательных дней в течение года. Как правило, эти значения вычисляются для гидрологического или климатического года, а не календарного. По определению, гидрологический год начинается с сезона, когда наиболее вероятны наибольшие значения стока, что позволяет не разрывать периоды низкого стока на несколько лет. Статистические данные, например средний годовой d -дневный минимум, вычисляются как d -дневные по продолжительности и T -летние по повторяемости и обозначаются Q_d, T . В общем случае величина продолжительности меженного периода d выбирается в соответствии с сельскохозяйственными, биологическими или инженерными приложениями, которые обычно связаны с риском, связанным с продолжительностью периода, когда воды в изучаемой водной системе недостаточно. Вычислительные методы, используемые для оценивания параметров распределения d -дневных меженных периодов, практически не отличаются от описанных выше методов анализа повторяемости паводков, и имеют небольшие изменения, например в методе оценивания параметров наименьшей наблюдаемой засухи для трехпараметрического распределения Гамбла.

Особый интерес для оценивания повторяемости статистик низкого стока продолжительностью d дней представляют два компонента ГОМС. Это I80.2.03 — аналитический программный пакет повторяемости низкого стока, который позволяет проверять гипотезы на случайность, однородность, тренд и независимость, и I80.2.04 — программа LOWSTATS, статистический программный пакет для анализа низкого стока.

Для продолжительности периодов низкого стока свыше одного года было выполнено незначительное число анализов. Повторяемость этих многолетних периодов низкого стока была определена с помощью графического метода (Carswell and Bond, 1980; Paulson and others, 1991). Анализ повторяемости многолетних периодов низкого стока важен для анализа запасов воды для водоснабжения, когда переходящий из года в год запас воды должен удовлетворять потребностям водоснабжения. Для облегчения анализа таких многолетних явлений можно использовать компонент ГОМС I80.2.05 — программа DROUGHT и метод оценивания вероятности n -месячной засухи.

Примеры кривых повторяемости низкого стока различной продолжительности приведены на рисунке II.5.9. Данные о низком стоке обычно наносятся на график по логарифмической или арифметической шкале по оси ординат и по нормальному масштабу вероятности или шкале Гамбла по оси абсцисс. Несмотря на то что лишь некоторые выборки данных образуют на графике идеально прямую линию, эти типы диаграммной бумаги используются для визуального оценивания общего соответствия модели данным. Для построения нормального распределения или распределения Гамбла в виде прямой линии была разработана специальная диаграммная бумага или клетчатка. Были также разработаны методы изменения масштаба по абсциссе для различных трехпараметрических распределений, чтобы интегральная функция распределения была представлена в виде прямой линии (Vogel and Kroll, 1989). Эти изменения масштаба применимы только для одной кривой из семейства кривых для конкретного семейства распределений, поскольку асимметрия быстро меняется во времени. Метод корректировки абсциссы для уменьшения асимметрии выборки обычно не используется в графическом представлении результатов анализа низкого стока.

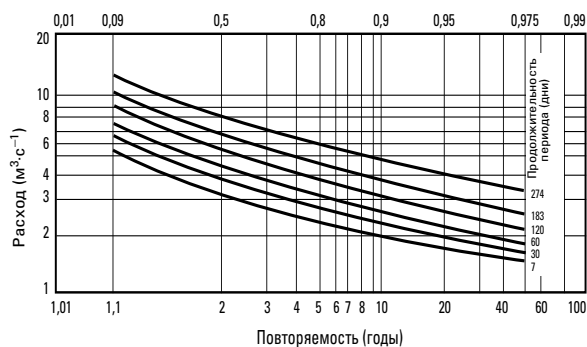


Рисунок II.5.9. Кривые повторяемости ежегодного межennaleго стока

5.8.3

Оценивание повторяемости низкого стока на постах с частичной записью с помощью измерений базисного стока

Методы, рассмотренные к настоящему моменту, касаются водомерных постов, имеющих достаточное количество данных наблюдений, на которых основан анализ повторяемости, — обычно 10 лет или более. Однако измерения расхода, сделанные на водомерных постах без регулярных измерений в периоды низкого или базисного стока, могут быть использованы для оценивания повторяемости низкого стока в сочетании с ежедневными измерениями стока на соседних водомерных постах. Посты, на которых возможно измерение только базисного стока, называются постами наблюдений по сокращенной программе. Установлено соотношение между измерениями базисного стока на посту наблюдений по сокращенной программе и текущим ежедневным стоком на соседнем водомерном посту. Это соотношение и характеристики низкого стока используются для оценивания d -дневного и T -годового стока на посту наблюдений по сокращенной программе. Соседний водомерный пост должен обладать такими же топографическими, климатическими и геологическими характеристиками, как и пост наблюдений по сокращенной программе. Для того чтобы получить линейное соотношение, для оценивания параметров этого линейного соотношения используются логарифмы текущих измерений базисного стока \tilde{y} на посту наблюдений по сокращенной программе и ежедневных значений стока \tilde{x} на соседнем водомерном посту. Такие наблюдения должны быть отделены от значительных ливневых осадков для того, чтобы надежно представлять независимые наблюдения за процессами низкого стока. Для определения соотношения текущих измерений базисного стока \tilde{y} и ежедневных значений стока \tilde{x} необходимо, по крайней мере, 10 спаренных наблюдений. Этот анализ основан на предположении или приближении, что соотношение между \tilde{y} и \tilde{x} можно описать так:

$$\tilde{y} = a + b\tilde{x} + e \quad e \sim N(0, s_e^2), \tag{5.47}$$

где a , b и s_e^2 — соответственно константа, коэффициент и дисперсия уравнения линейной регрессии. Предполагается, что остаточные отклонения e независимы и нормально распределены. Оценки среднего $M(y)$ и изменчивости $S^2(y)$ годового минимума d -дневного низкого стока на посту наблюдений по сокращенной программе описываются следующим образом:

$$M(y) = a + b M(x) \tag{5.48}$$

и

$$S^2(y) = b^2 S^2(x) + S_e^2 [1 - (S^2(x)/(L-1)S^2(\tilde{x}))], \tag{5.49}$$

где $M(x)$ и $S^2(x)$ — оценки среднего значения и дисперсии годового минимума d -дневных периодов низкого стока на водомерной станции, L — число измерений базисного стока и $S^2(\bar{x})$ — дисперсия соответствующих ежедневных расходов воды на соседнем водомерном посту.

Начальное предположение о соотношении между мгновенными значениями низкого стока, как показано в уравнении (5.47), остается таким же, как соотношение между годовым d -дневным минимумом низкого стока на двух постах. Это необходимое предположение, если предложенный метод должен быть использован для оценивания d -дневных и T -летних значений продолжительности низкого стока на посту наблюдений по сокращенной программе. В то время как приближение кажется надежным для среднего значения за d дней — примерно до 7 дней, для более длинных периодов оно может быть неприемлемым. Стидингер и Томас (Stedinger and Thomas, 1985) и Томас и Стидингер (Thomas and Stedinger, 1991) рассматривают использование измерений базисного стока для оценивания характеристик низкого стока на постах наблюдений по сокращенной программе в США.

Низкий сток d -дневный и T -летний на посту наблюдений по сокращенной программе оценивается с помощью среднего значения и дисперсии, данных в уравнениях (5.48) и (5.49). Если используется трехпараметрическое распределение для оценки d -дневного, T -летнего стока на посту наблюдений по сокращенной программе, тогда асимметрия стока на водомерном посту и посту наблюдений по сокращенной программе принимается одинаковой. Как было сказано выше, d -дневный и T -летний низкий сток можно оценить методами, описанными в разделе 5.8.2. Стидингер и Томас (1985 г.) объясняют, почему d -дневный и T -летний низкий сток на водомерном посту в уравнении (5.47) нельзя использовать как независимую переменную. Уменьшение дисперсии связано с использованием для оценивания повторяемости d -дневного и T -летнего низкого стока уравнения регрессии, основанного на методе наименьших квадратов. В частности, подставляя значения d -дневного и T -летнего низкого стока на водомерном посту в уравнение (5.47), получаем завышение d -дневного и T -летнего низкого стока для поста наблюдений по сокращенной программе. Стидингер и Томас (Stedinger and Thomas, 1985) разработали процедуру получения неискаженных оценок изменчивости годовых d -дневных значений стока на посту наблюдений по сокращенной программе с помощью соотношения, данного в уравнении (5.49), и значений дисперсии годовых d -дневных значений низкого стока и соответствующих значений ежедневных расходов воды на соседних водомерных постах.

Стидингер и Томас (Stedinger and Thomas, 1985) также разработали метод оценивания среднеквадратической ошибки d -дневного и T -летнего низкого стока на посту наблюдений по сокращенной программе. Они показали, что среднеквадратическая ошибка является функцией корреляции между измерениями базисного стока и ежедневных расходов воды, числа измерений базисного стока, сделанных на посту наблюдений по сокращенной программе, величины отклонения d -дневного T -летнего низкого стока на водомерной посту от среднего значения ежедневных расходов, используемых в уравнении (5.43), и продолжительности наблюдений на водомерном посту. Используя данные 20 пар водомерных постов на востоке США, Стидингер и Томас (Stedinger and Thomas, 1985) показали, что среднеквадратические ошибки для постов наблюдений по сокращенной программе могут достигать 30 процентов при коэффициенте корреляции 0,7 и 15 измерениях базисного стока и 25-летних наблюдениях на водомерном посту. Используя данные наблюдений на 1 300 водомерных постах, расположенных в центральной части США, Рейлли и Кролль (Reilly and Kroll, 2003) продемонстрировали, что метод корреляции базисного стока дал улучшенные результаты работы моделей региональной регрессии для 15 из 18 главных речных бассейнов США. Поскольку этот метод использует данные, полученные на исследуемом водомерном посту, метод корреляции базисного стока дает более точные оценки d -дневных T -летних значений низкого стока, чем давали бы модели региональной регрессии, которые будут рассмотрены в следующем разделе.

5.8.4 Районирование статистических характеристик повторяемости низкого стока

Методы, описанные к настоящему моменту, применимы для постов, имеющих достаточное количество данных, на которых основывается анализ повторяемости, или имеющих возможности для измерения базисного стока. Такие посты должны быть относительно свободны от антропогенного воздействия и должны иметь ряды наблюдений продолжительностью, достаточной для получения точного представления о статистических характеристиках низкого стока с данного бассейна. Для неизученных водосборов эти статистические характеристики можно оценить с помощью методов районирования или путем получения статистик из обобщенного временного ряда, полученного при помощи статистического или детерминистического моделирования. Первый подход широко используется для оценивания статистик исследуемого вида низкого стока, например семидневного двухлетнего ($Q7,2$) низкого стока на участках, где не проводятся постоянные измерения. Определяемая статистика коррелирует с некоторым числом независимых или обуславливающих переменных. Эти независимые переменные представляют

физические и климатические характеристики бассейна. Такие подходы с успехом используются для оценивания расчетных паводков, но было обнаружено, что найти точную регрессионную модель для оценивания статистик низкого стока намного сложнее (Vogel and Kroll, 1992; Waltemeyer, 2002).

Районирование обычно подразумевает идентификацию однородных районов, для которых применимо уравнение регрессии. Районирование — это попытка сгруппировать бассейны географически или в многомерном пространстве, которое может не состоять из географически сопредельных районов, на основе схожих физико-географических, климатических характеристик или характеристик стока. В общем случае возможность определять однородные районы приводит к повышению точности предсказаний и получению более содержательных физических моделей для процедуры статистического оценивания (Nathan and McMahon, 1992; Waltemeyer, 2002).

Компонент ГОМС K10.2.04 — региональный анализ характеристик потока — описывает методы развития региональных взаимосвязей между характеристиками потока и бассейна.

Региональные модели низкого стока обычно имеют следующий вид:

$$Q_{d,T} = aX_1^b X_2^c X_3^d \dots, \quad (5.50)$$

где $Q_{d,T}$ — d-дневная T-летняя статистика низкого стока, X_i — физико-географические или климатические характеристики, a , b , c и d — постоянные, которые можно получить методом множественной регрессии (Weisberg, 1980; Draper and Smith, 1981). Разнообразные статистические данные низкого стока оцениваются на основании анализа повторяемости данных с разных постов в этом районе. Характеристики бассейна и климатические характеристики, в свою очередь, получены из карт или климатических данных (см. Institute of Hydrology, 1980; Vogel and Kroll, 1992; Waltemeyer, 2002). Параметры уравнения можно оценить с помощью методов обычных, взвешенных или обобщенных наименьших квадратов. Хотя метод обобщенных наименьших квадратов сложен в применении по сравнению с методом обычных наименьших квадратов, Вогель и Кроль (Vogel and Kroll, 1990) обнаружили при моделировании 23 бассейнов в Массачусетсе, что оцененные параметры и t-соотношения, полученные с помощью этих двух методов, были практически идентичными. Однако более сложный подход предоставляет информацию о структуре ошибки прогноза, позволяя определить источник ошибки в погрешности модели, погрешности измерения и неопределенности выборки. Вогель и Кроль (Vogel and Kroll, 1990) отметили, что погрешность модели является главной составляющей

ошибки прогноза. Их анализ помогает подчеркнуть важность составления физически более полноценных статистических моделей.

Региональные уравнения регрессии, такие как уравнение (5.50), применимы для районов, где d-дневные T-летние значения низкого стока не являются нулевыми. Таскер (Tasker, 1991) разработал метод оценивания межлетнего стока для случаев, когда d-дневные T-летние значения низкого стока могут равняться нулю. Эти методы включают в себя разработку региональных соотношений с усеченными данными и использование логарифмической или экспоненциальной регрессии для оценивания вероятности нулевых d-дневных T-летних значений низкого стока.

Многочисленные бассейновые и климатические характеристики используются в региональных уравнениях регрессии для оценивания статистик значений низкого стока. Большинство моделей включают в себя площадь водосбора и различные переменные, представляющие климатические условия, например среднегодовое количество осадков. Рассматривались и другие многочисленные характеристики, некоторыми из которых являются: средняя высота водосбора, коэффициент залесенности, густота русловой сети, средний уклон бассейна, коэффициент заболоченности, уклон основного русла и коэффициент урбанизации. Исходя из того, что межлетний сток является результатом продолжительного отсутствия дождевых осадков, обычно принимается то, что характеристики низкого стока должны быть тесно связаны с геологическими и почвенными характеристиками бассейна (Institute of Hydrology, 1980; Task Committee of the Hydraulics Division, 1980).

В некоторых случаях соотношения были улучшены путем включения определяющей переменной, характеризующей геологический показатель. Такие индексы получили возрастающую популярность и повысили эффективность моделей. Показатель базисного стока (Institute of Hydrology, 1980) должен частично характеризовать геологию бассейна и отношение стока, известного как базисный сток, к общему стоку. Согласно Густарду и Ирвингу (Gustard and Irving, 1994) прогностические модели могут быть улучшены за счет индекса почвы.

Для улучшения связей между характеристиками низкого стока и кривых спада или коэффициентов спада для бассейна применяется другой подход. Для оценивания характеристик низкого стока для неизученных водотоков Бингхэм (Bingham, 1982) определил индекс кривой спада, который измеряется в сутках в течение наблюдаемого цикла истощения стока, на водотоках в Алабаме и Теннесси (США), а потом картировал эти индексы в соответствии с рассчитанными для водомерных постов величинами и геологическими картами.

Вогель и Кроль (Vogel and Kroll, 1992) сформулировали концептуальную модель формы уравнения (5.50) для нахождения соотношения между нерегулируемым стоком бассейна в период спада и характеристиками бассейна. Они получили уравнение регрессии для $Q_{7,10}$ с тремя из пяти переменных концептуальной модели. Вогель и Кроль обнаружили очень значительное повышение точности за счет включения в финальную модель спада трех переменных. Они рассматривали следующие характеристики: площадь водосбора, постоянную кривой спада базисного стока и средний уклон водосбора. Полученное уравнение, несмотря на его точность, нельзя использовать непосредственно в пункте, где не измеряется сток, без дополнительных действий, необходимых для оценивания постоянной кривой спада базисного стока. Вогель и Кроль предположили, что эту независимую переменную можно оценить на картах, которые должны быть построены или получены с помощью небольшой программы, направленной на измерение стока. Также они предположили, что постоянную спада можно оценить просто изучая несколько гидрографов в периоды спада.

В других региональных исследованиях низкого стока в США были использованы в качестве пояснительных переменных характеристики почвы (Carpenter and Hayes, 1996) и наклон кривой продолжительности стока (Arihood and Glatfelter, 1991) для оценивания характеристик низкого стока. Арихуд и Глатфельтер (1986) нанесли на карту соотношение 20-процентной и 90-процентной продолжительности стока в Индиане для их использования при оценке характеристик неизученных водосборов. Кривые продолжительности стояния стока рассматриваются в следующем разделе настоящего Руководства.

5.8.5 Кривые продолжительности стояния стока

Кривые продолжительности стояния ежедневных расходов показывают в процентах количество суток, в течение которых сток равен или превышает заданное значение за период наблюдений. Однако они не дают информации о последовательности этих расходов во времени или вероятности превышения или непревышения в любой заданный год. Даже с такими временными ограничениями, кривые стояния стока имеют длинную историю использования в планировании и управлении водными ресурсами для различных целей. Наиболее часто кривые продолжительности стока используются при расчете гидроэнергетического потенциала при оценивании как основных, так и второстепенных мощностей, при планировании водоснабжения и ирригации, распределении сброса загрязняющих веществ и решении других проблем управления качеством воды. Среди других областей применения кривых продолжительности стояния стока —

определение восстановительной способности водочистных сооружений, изучение наносов рек и водохранилищ, определение требований к водотокам, как среде обитания животных и растений, и оптимизация забора воды из водохранилищ. Они также очень просты и полезны для графической иллюстрации характеристик стока начиная от паводков и половодий и до самых маленьких значений низкого стока с рассматриваемого водосбора. Форма кривой может изменяться от бассейна к бассейну, отражая различия в физико-географических и климатических условиях. Они также полезны для иллюстрации влияния различных видов внешнего воздействия на водообеспеченность и могут быть использованы для многих других целей.

Кривая продолжительности обычно строится эмпирически посредством вычисления ряда отношений числа дней, в которые расходы воды равны или превышают заданные значения, к общему числу дней в ряду. Для построения такой кривой отношения, которые являются оценками вероятности, наносятся на график относительно соответствующих расходов. Кривая продолжительности на графике имеет, как правило, вид прямой линии при нанесении на логарифмическую клетчатку вероятности, подобно той, что изображена на рисунке II.5.10. Такой тип клетчатки вероятности обеспечивает одинаковую точность для любых расходов воды, что позволяет лучше видеть различия в характеристиках низкого стока. Иногда для упрощения ранжирования данных кривые продолжительности строят по недельным или месячным расходам. В таких случаях образуемая кривая отражает процентное распределение недельных или месячных расходов, а не продолжительность суточных. Такие кривые, как правило, менее применимы, чем кривая продолжительности суточных расходов.

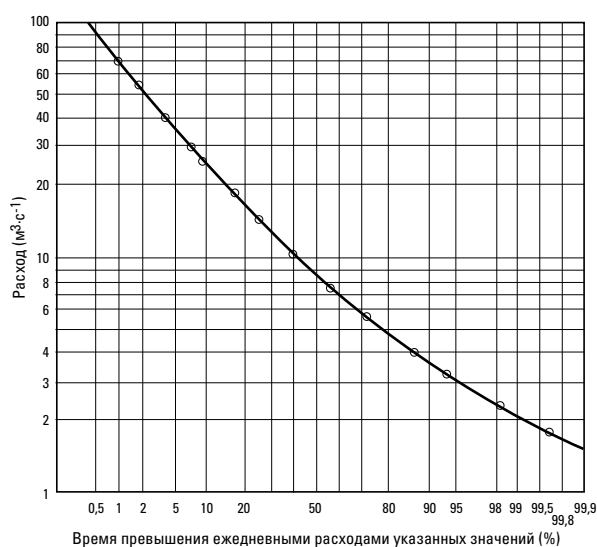


Рисунок II.5.10. Кривая обеспеченности ежедневных расходов

Если данные о потоке стационарны, то полученная кривая продолжительности должна давать долгосрочную информацию о вероятности превышения для всего диапазона расходов воды, которая является полезным инструментом планирования. Хвосты кривой продолжительности стока оказались чувствительными к количеству лет, используемых для оценки кривой, что является видом ошибки выборки. Дополнительные подробности построения кривых можно найти в других источниках (см., например, Сирси (Searcy, 1959), Институт гидрологии (Institute of Hydrology, 1980) и Вогель и Феннеси (Vogel and Fennessey, 1994)).

Кривые продолжительности стока можно рассчитать для каждого года со средним значением или медианой кривых продолжительности годового базисного стока, представляющих типичную кривую (Vogel and Fennessey, 1994). Это позволяет рассчитывать доверительные интервалы и периоды повторяемости по кривой продолжительности стока, а итоговая медианная кривая среднего годового стока будет менее чувствительной к экстремальным периодам наблюдений, которые могут возникать на протяжении истории существования поста.

Общая форма и, в частности, форма нижней части кривой продолжительности стока, является показателем физико-географических, геологических и климатических условий бассейна. Форма нижней части кривой продолжительности стока является наиболее интересной для изучения значений низкого стока. Пологая нижняя часть кривой означает, что бассейн является водопроницаемым, что его отклик на дождевые осадки не является мгновенным. Наоборот, крутая нижняя часть кривой говорит о том, что бассейн является менее водопроницаемым и что он мгновенно реагирует на выпадение заданного количества дождевых осадков. Бассейн с высокой водопроницаемостью имеет более высокий показатель базового стока, чем с низкой (Zaidman and others, 2003).

Для обеспечения оценки продолжительности стока для неизученных створов в однородном районе можно составить региональные соотношения (Institute of Hydrology, 1980; Fennessey and Vogel, 1990; Ries, 1994). Для этих целей можно также разработать модели множественной регрессии, подобные тем, которые используются для оценивания статистик низкого стока, таких как $Q_{7,10}$. Зависимой переменной могло бы быть, например, значение стока, превышенного в течение 95 процентов времени, обозначаемого Q_{95} (Institute of Hydrology, 1980). Независимые переменные в таких соотношениях также подобны тем, которые используются при оценивании других статистик низкого стока; они могли бы отражать характеристики бассейна и климатические условия, такие как площадь водосбора и многолетнее среднегодовое количество осадков,

выпавших на данный водосбор. Для оценивания параметров кривых продолжительности стока можно использовать компонент ГОМС K10.2.05, районирование кривых продолжительности стока, или программное обеспечение REGFLOW. Его также можно использовать для установления соотношения между ними и геоморфологическими характеристиками, так чтобы кривые продолжительности стока можно было бы оценить и для неизученных водосборов.

5.9 АНАЛИЗ ПОВТОРЯЕМОСТИ ПАВОДКОВЫХ СТОКОВ

[ГОМС H83, I81, K10, K15]

В ряде случаев, например при проектировании водохранилища, необходимо установить повторяемость объемов паводка и максимальных расходов. В этом случае можно использовать многомерный статистический анализ гидрографов паводков. Гидрограф паводка можно определить, используя следующие случайные переменные:

Q_{max} — максимальный расход в течение паводка или половодья; V — объем волны паводка или половодья (m^3); T — продолжительность паводка или половодья.

Пользуясь другой системой переменных, гидрограф паводка или половодья можно определить с помощью последовательности расходов $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ за соответствующие последовательные равные интервалы времени в течение паводка или половодья. Статистический анализ случайных переменных (Q, V, T) или (Q_1, \dots, Q_n) можно выполнить с помощью многомерного вероятностного распределения. Некоторые определения и расчетные методы, связанные с такими вероятностными моделями, можно найти в работах Кавадас (Cavadias, 1990). Применительно к характеристикам паводка, для того чтобы нормализовать данные, можно использовать метод трансформации или другие методы. В качестве альтернативного варианта повторяемость или вероятность наступления или ненаступления паводка определенного объема в течение n дней можно непосредственно оценить методом анализа повторяемости на основании данных о стоке в пункте наблюдений или путем использования методов районирования.

Целью расчета повторяемости паводка и дождевых осадков является установление связи между величиной паводка или слоем дождевых осадков и их повторяемостью или вероятностью наступления в будущем. Ключевыми предпосылками, которые позволяют интерпретировать повторяемость как вероятностное явление, являются независимость элементов анализируемой выборки во времени и ее однородность. Использование неполных рядов при исследовании

паводков является более проблематичным, чем при исследовании дождевых осадков, поскольку максимальные расходы разных паводков в течение года могут быть менее независимыми по сравнению с вызвавшими их осадками. Однако если при выборе значений, превышающих заданный порог, соблюдается осторожность, то анализ неполных рядов может оказаться вполне приемлемым. Гораздо чаще для исследования рядов годовых максимумов — рядов максимального годового стока — применяется анализ повторяемости.

Ряды максимального годового стока могут состоять либо из суточных максимумов, либо из мгновенных расходов во время паводка или половодья. Важно определить, какие именно данные требуются для анализа. Взаимосвязь этих двух рядов в одном пункте зависит от физических характеристик водосбора, а также от климатических факторов, вызывающих формирование максимумов в обоих случаях. На очень маленьких водосборах обычно оба максимума не могут иметь место в один и тот же день и не могут явиться результатом одинаковых климатических процессов, происходящих на водосборе.

Таким образом, самым простым и эффективным методом оценивания повторяемости сильных паводков и половодий является «подгонка» одного из распределений повторяемости, описанных в разделе 5.1, для отражения имеющихся данных наблюдений на посту с использованием специальных процедур оценивания (см. раздел 5.5). К сожалению, на рассматриваемых постах не всегда имеются необходимые данные наблюдений, и ряды данных могут быть слишком короткими для получения надежных оценок редких паводков. Следовательно, большая часть рассуждений в этом разделе направлена на использование информации, полученной более чем с одного поста, для оценивания квантилей рядов паводков и половодий на постах, на которых нет соответствующих данных наблюдений.

Необходимо также обратить внимание на вычисление повторяемости паводков: следует четко разделять уровни и расходы воды. При естественных изменениях во времени зависимости между уровнем и расходом или при непосредственном воздействии на русло многие данные об уровнях станут неоднородными и непригодными для анализа повторяемости. В большинстве случаев целесообразнее работать с расходами и, при необходимости, преобразовывать результаты анализа повторяемости расходов в результаты для уровней, используя самые последние зависимости между уровнями и расходами. В некоторых случаях, например при образовании высоких уровней за счет затора, при определении зон затопления целесообразнее работать только с уровнями, поскольку расход воды в этом случае не имеет значения.

5.9.1

Обобщение характеристик паводков по району

Для пункта, по которому нет большого количества наблюдений в виде рядов максимальных годовых расходов, для оценивания квантилей характеристик паводков и половодий рекомендуется использовать региональный анализ их повторяемости. Даже при наличии 50-летнего периода наблюдений за стоком бывает трудно выполнить районирование параметра формы распределения. Как только ряд наблюдений становится короче, необходимо рассматривать возможность районирования коэффициента вариации. Однако возможность районирования зависит от однородности рассматриваемого региона и относительной точности методов оценивания параметров распределения в данной точке, которые зависят от коэффициента изменчивости и асимметрии распределения паводка в регионе. Довольно широко используются два метода районирования: один из них — метод индексирования паводков, другой основан на использовании регрессионных подходов. Филл и Стидингер (Fill and Stedinger, 1998) рассмотрели комбинацию этих двух методов. Региональные методы получения оценок характеристик паводков в рассматриваемом пункте основаны на анализе данных, полученных на других постах того же гидрологического района. Кэннан (Cunnane, 1988) показал, что региональный подход может давать более точные оценки даже при очень большом количестве данных на данном гидрометрическом посту. В общем случае существуют два этапа в региональном методе анализа повторяемости паводков:

- a) уточнение контура гидрологически однородных районов и идентификация гидрометрических постов со сходным режимом;
- b) региональное оценивание, которое включает в себя перенесение информации с водомерных постов, на которых она была получена, на интересующие пункты внутри того же района.

Однородные районы можно определить тремя способами, как показано на рисунке II.5.11:

- a) как фиксированные географически сопредельные районы;
- b) как географически разрозненные районы;
- c) как граничащие между собой области, где каждая целевая станция связана только со своим районом.

Региональные процедуры оценивания паводков и половодий можно определить, рассматривая различные комбинации методов определения однородных районов и некоторого числа региональных методов оценивания (Stedinger and Tasker, 1986; Burn, 1990; Fill and Stedinger, 1998; Pandey and Nguyen, 1999). Группа GREHYS (1996a, 1996b), выполняющая исследования в области гидрологической статистики, представила результаты взаимного сравнения различных методов

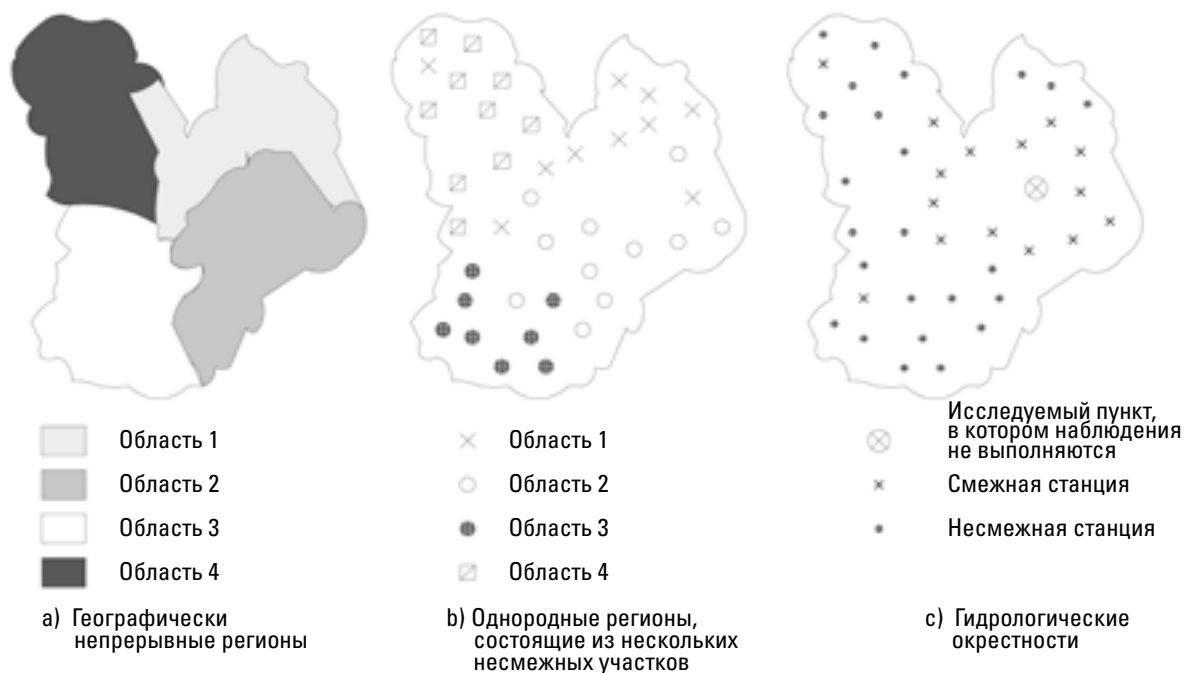


Рисунок II.5.11. Подходы для определения границ однородных области (Ouarda and others, 2001)

регионального оценивания паводков, полученные соединением четырех методов определения границ гидрологически однородных районов и семи региональных методов оценивания. Исследователи группы GREHYS (1996b) пришли к выводу, что «областной» метод очерчивания границ однородных районов является лучшим по сравнению с методами с фиксированными районами. Гидрологические сопредельные области можно найти с помощью метода определения области влияния (Burn, 1990) или канонического корреляционного анализа (Cavadias, 1990; Ouarda and others, 1998). Региональное оценивание паводков и половодий также может быть выполнено с помощью метода индексирования паводков или метода множественных регрессий.

5.9.2 Уточнение контура однородных районов

5.9.2.1 Метод области влияния

При использовании метода области влияния (Burn, 1990) каждый гидрометрический пост рассматривается как центр своего района. Определение области влияния поста основано на Евклидовой системе измерения расстояния в многомерном пространстве признаков. Набор признаков может быть связан с характеристиками экстремального стока водосбора. Для того чтобы отразить относительную важность каждого поста для регионального оценивания характеристик распределения на исследуемом посту, определяется весовая функция. В исходном подходе признаки стока использовались для определения области влияния,

показывающей, что на рассматриваемом посту должны проводиться измерения. Для тех постов, на которых измерения не проводятся, климатологическая и физико-географическая информация может заменить гидрологическую информацию. Следовательно, здесь могут быть рассмотрены несколько версий подхода к области влияния: в зависимости от пространства признаков и от того, проводятся ли на исследуемом посту измерения. Гидрологические признаки можно рассматривать как коэффициенты вариации максимальных паводков и отношение среднего максимального стока к площади водосбора. Другие признаки включают в себя долготу, широту и метеорологические признаки, связанные со средним годовым количеством осадков или средней высотой снежного покрова на поверхности водосбора за пять дней до весеннего паводка.

Взвешенное Евклидово расстояние в пространстве признаков, D_{ij} , между двумя постами i и j находится с помощью следующего уравнения:

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{m=1}^M \omega_m (C_m^i - C_m^j)^2}, \quad (5.51)$$

где M — число рассмотренных признаков, C_m^i и C_m^j — нормализованные значения признака m для постов i и j . Признаки нормализованы путем деления на среднеквадратическое отклонение, определенное по полному набору станций. Следующий шаг определения границы группы станций, включаемых в район влияния рассматриваемого поста, заключается в выборе предельных значений ω на D_{ij} .

5.9.2.2 Канонический корреляционный анализ

Канонический корреляционный анализ — это метод многомерного статистического анализа, который позволяет уменьшить степень линейной зависимости между двумя группами переменных. Этот метод можно использовать для идентификации постов с режимами паводков, схожими с режимом в исследуемом пункте (Cavadias, 1990; Ouarda and others, 1997).

Уарда и др. (Ouarda and others, 1997) показали, что метод множественной регрессии и метод индексирования паводков дают эквивалентные результаты в том случае, если они объединены с каноническим корреляционным анализом. Уарда и др. (Ouarda and others, 1999) представили автоматический и взаимозаменяемый региональный метод, основанный на каноническом корреляционном анализе и множественной регрессии. Общая методология, представленная в публикации Уарды и др. (Ouarda and others, 2000), позволяет получить совместную оценку пиков и объемов паводков. Более подробное описание методологии канонического корреляционного анализа для регионального оценивания повторяемости приведено в работе Уарды и др. (Ouarda and others, 2001), а общее описание метода – в работе Мюрхэда (Muirhead, 1982).

5.9.3 Региональные методы оценивания паводков

Второй этап регионального анализа заключается в получении информации о паводках на рассматриваемом посту в виде квантилей. Это делается на основе данных с постов, идентифицированных на первом этапе анализа. Региональное оценивание может быть выполнено при помощи индексов паводков или регрессионных методов.

5.9.3.1 Метод индексов паводков

Метод индексов паводков состоит из двух основных этапов. Первый этап — построение безразмерной кривой обеспеченности для однородного района. Эту кривую получают в результате анализа повторяемости для всех постов и по каждому посту в отдельности. Кривая по каждой станции строится безразмерной путем деления ординат кривой на некий индекс, например индекс паводка, соответствующий периоду повторяемости в 2 года или в 2,33 года, или среднему значению ряда. Медианные безразмерные значения выбираются для разных периодов повторяемости по данным, полученным на всех постах. Затем они наносятся на клетчатку вероятностей. На втором этапе строится зависимость между индексом и физическими и климатическими характеристиками водосбора, для чего можно использовать подходы, основанные на регрессионном анализе. Комбинируя индексы с

безразмерной кривой, можно получить кривую обеспеченности для любого водосбора в пределах данного района.

Большая работа была проделана по развитию исходных концепций и повышению точности метода индексов для определения различных квантилей паводков, например в работах Габриэля и Арнелла (Gabriele and Arnell, 1991). Достижению успехов в этой области способствовала разработка вероятностного метода взвешенных моментов (Greenwood and others, 1979) и L-моментных статистик (Hosking, 1990). Необходимости проведения аналитических тестов на однородность можно избежать, используя методы Монте-Карло. Однородность должна и может характеризоваться по наклону кривой, которая, по методу Далримпля, определяется коэффициентом вариации, включая также оценки асимметрии и эксцесса для рассматриваемого района. Это ведет к более гибкому применению индекса и позволяет применить моменты высшего порядка с использованием всех данных по району, чтобы получить наиболее достоверное распределение. Неоднородность более низких моментов можно оценить и потенциально связать с характеристиками водосбора. Хоскинг и Уоллис (Hosking and Wallis, 1988) показывают, что «даже тогда, когда присутствуют однородность и взаимозависимость в данных по станциям, а форма (регионального) вероятностного распределения паводков определена недостаточно надежно, предпочтение следует отдавать региональному анализу повторяемости паводков, а не анализу точечных данных». Метод индекса паводков оказался одним из самых эффективных методов районирования.

5.9.3.2 Методы, основанные на регрессии

Для оценивания величины паводкового расхода, который будет иметь место в среднем один раз в Tr -лет и обозначенного Q_{TR} , можно воспользоваться регрессионными методами с использованием физических и климатических характеристик водосбора. Величина паводка при разных периодах повторяемости для каждой станции оценивается на основании анализа повторяемости этих явлений с использованием предварительно выбранного распределения. В свою очередь, указанные выше характеристики по каждому водосбору определяются по топографическим картам или на основании обобщенных климатологических данных. Параметры уравнений, связывающих Q_{TR} с характеристиками водосбора, можно получить с помощью обычного метода наименьших квадратов, взвешенных наименьших квадратов или обобщенных наименьших квадратов. Последние два подхода используются в целях устранения недостатков, имеющих место при использовании обычного метода наименьших квадратов. Этот метод не учитывает различных погрешностей определения характеристик паводков, которые

обусловлены разной продолжительностью рядов наблюдений по отдельным станциям, на которых проводятся наблюдения. Tasker (Tasker, 1980) предложил использовать метод взвешенных наименьших квадратов с дисперсией погрешностей определения наблюдаемых характеристик паводка, рассчитанной как обратная функция длины ряда. Метод обобщенных наименьших квадратов был предложен, поскольку он позволяет учесть как неодинаковую надежность, так и неодинаковую корреляцию между характеристиками паводков, полученных по отдельным пунктам. Используя метод Монте-Карло, Стидингер и Tasker (Stedinger and Tasker, 1985 и 1986) показали, что метод обобщенных наименьших квадратов обеспечивает более точные оценки коэффициентов регрессии, их большую надежность и лучшие оценки погрешностей модели.

Региональная зависимость повторяемости паводков и половодий для северо-восточных районов США была получена Бенсоном (1962):

$$Q_{TR} = aA^b Z^c S^d P^e D^f M^g, \quad (5.52)$$

где Q_{TR} — максимальный годовой расход повторяемостью T -лет; A — площадь водосбора; Z — уклон основного русла; S — процент относительной площади поверхностного задержания плюс 0,5 %; P — интенсивность дождевых осадков повторяемостью T -лет; D — среднее значение январской отрицательной температуры воздуха; M — орографический фактор; и a, b, c, d, e, f и g — коэффициенты регрессии. При получении уравнения (5.52) были опробованы многие независимые переменные и способы их определения. Это делалось для того, чтобы получить независимые друг от друга переменные, которые физически связаны с зависимой переменной. Независимые переменные, которые связаны с паводком редкой повторяемости, не могут обуславливать паводки частой повторяемости. Логарифмическое преобразование уравнения (5.47) можно использовать для создания линейной аддитивной модели применительно к методу регрессии. Другие типы преобразований так же можно применить к зависимым и независимым переменным, однако наиболее распространенным остается логарифмическое преобразование. Знаки и величины коэффициентов модели должны иметь гидрологический смысл. Например, показатель степени d члена уравнения, характеризующего поверхностное задержание, должен иметь отрицательный знак, потому что влияние такого задержания (при наличии озера, водохранилища и т. д.) заключается в распластывании пиков паводка. Другие показатели степени должны быть положительными, причем их величины изменяются в зависимости от периода повторяемости. Необходимо иметь в виду, что в модель не следует вводить слишком большое число независимых переменных. Переменные, включенные

в регрессионную модель, должны быть статистически значимыми на некотором заданном и общепринятом уровне значимости (Draper and Smith, 1981).

Получаемое в результате уравнение регрессии должно быть оценено на его региональную однородность. Остаточные погрешности регрессии следует нанести на топографические карты, чтобы визуально проверить очевидность их смещенности с учетом географических особенностей местности. Если при оценке максимального годового расхода за T -лет такая смещенность очевидна, то для проверки ее значимости можно использовать тест Уилкоксона. Этот тест обеспечивает объективную проверку гипотезы, что медиана остатков в субрегионе соответствует медиане остаточных погрешностей основного региона, для которого и было получено уравнение регрессии. Для разных периодов повторяемости можно выбрать разные однородные регионы. Однородный регион, принятый для получения зависимости, связывающей индекс паводка с характеристиками водосбора, не обязательно должен совпадать с однородным регионом, по которому принимается характерное распределение при использовании метода индекса, подобное наклону безразмерной кривой.

На практике степенная функция является наиболее широко используемой моделью для описания соотношения между оценками квантилей паводка Q_T на месте и гидрометеорологических условий и характеристик бассейна для района, обозначенного на первом этапе метода. Общий метод оценивания параметров состоит из приведения соотношения мощности к линейному виду с помощью логарифмических преобразований, а затем оценки параметров этой модели с помощью обычного метода наименьших квадратов. Таким образом, обычный метод очень прост, поскольку можно использовать метод множественной линейной регрессии для определения параметров нелинейной модели.

Преимуществом региональных моделей оценивания, основанных на множественной регрессии, является их гибкость в выборе типа распределения для представления превышений на каждом посту. Региональный метод оценивания, основанный на регрессии, можно также применять, используя пики, выходящие за пороговые значения; в этом случае можно использовать обобщенное распределение Парето, экспоненциальное распределение или распределение Вейбулла. И обобщенное распределение Парето, и распределение Вейбулла в частном случае содержат менее гибкое экспоненциальное распределение. В подходе, использующем значения, превышающие пороговые, рассматриваются все пики паводков выше установленных пределов. Отсутствие подробных руководящих принципов для выбора подходящих пороговых значений является причиной серьезных изъянов в методе и одной из

причин того, почему этот метод на практике применяется реже, чем его двойник для оценивания рядов годовых паводков. Различные методы выбора пороговых значений рассмотрены Лангом и др. (Lang and others, 1999).

Метод, основанный на регрессии, можно также представить с помощью непараметрического анализа повторяемости, который не требует выбора априорного распределения. Адамовски (Adamowski, 1989) и Гуо (Guo, 1991) обнаружили, что непараметрические методы подходят для мультимодальных смещенных распределений данных о годовых паводках. Непараметрические оценки плотности, включая непараметрическую регрессию (Gingras and others, 1995), успешно использовались в рамках регионального анализа (GREHYS, 1996b). Метод L-моментов можно использовать на всех этапах регионального анализа, включая нахождение границ однородных районов и их проверку, нахождение и проверку региональных распределений и оценивание квантилей (Hosking and Wallis, 1997).

5.9.4 **Местный и региональный подход к анализу связи между продолжительностью и повторяемостью стока**

В большей части литературы, посвященной региональному анализу повторяемости, паводки и половодья описываются только их мгновенным пиком или максимальным ежедневным расходом. При проектировании гидротехнических сооружений или нанесении на карту пойм рек информация о пиках паводков важна, но может потребоваться большее количество информации. Опасность и серьезность паводка определяются не только величиной его пика, но и его объемом и продолжительностью. Анализ повторяемости паводков или QDF (Sherwood, 1994; Javelle, 2001), также известной как повторяемость продолжительности паводка или повторяемость отклонения расхода, был предложен в качестве метода более детального описания паводка. Анализ соотношения повторяемости и продолжительности паводка похож на анализ соотношения интенсивности, продолжительности и повторяемости, широко используемый для дождевых осадков (см. раздел 5.7). В этом случае усредненные расходы рассчитываются для разных фиксированных продолжительностей D . Для каждой продолжительности затем анализируется распределение вероятности максимального расхода. Наконец, подбирается непрерывное определение как функция периода повторяемости (T) и продолжительности (D), за которые и усредняется расход. Явелль и др. (Javelle and others, 2002) предложили конвергентную модель, описывающую продолжительность и повторяемость сходящегося паводка,

основанную на предположении о сходимости различных распределений расходов для маленьких периодов продолжительности. Эта формулировка была успешно проверена на бассейнах, расположенных в Канаде, на Мартинике и во Франции.

Явелль и др. (Javelle and others, 2002) также представили региональный подход к анализу соотношения стока, его продолжительности и повторяемости, объединяющий местную формулировку соотношения продолжительности и повторяемости стока, введенную Явеллем (Javelle, 2001), и метод индекса паводков, описанный в разделе 5.9.3.1, который широко применяется в региональном анализе повторяемости паводков. Эта региональная модель была разработана Явеллем и др. (Javelle and others, 2003) для 169 водосборов в канадских провинциях Квебек и Онтарио и использовалась для определения типа поведения паводка и обозначения соответствующих районов. Явелль и др. (Javelle and others, 2003) показали, что параметры региональной модели, описывающей связь продолжительности и повторяемости стока, дают информацию о динамике паводка. В отличие от анализа связи интенсивности, продолжительности и повторяемости дождевых осадков, анализ связи продолжительности и повторяемости стока не используется, несмотря на свой большой потенциал.

5.9.5 **Объединение данных отдельного поста и района**

Задача процедуры, которая ставит себе целью объединить информацию с отдельного поста и региона, заключается в улучшении оценок для отдельных постов на основе ограниченных рядов наблюдений в них и имеющейся информации с других постов. Потребность в таких процедурах особенно велика при оценивании экстремальных гидрологических явлений, где комбинация ограниченных местных данных и влияние хвостов распределений вероятности дестабилизирует получаемые оценки. Простой Байесовский метод, представленный Фортиным и др. (Fortin and others, 1998), объединяет локальные и региональные оценки квантилей на основе информации об изменчивости оценивания для каждой из оценок. В США имеются руководства по объединению локальных оценок квантилей, полученных с помощью региональной регрессии, используя среднеквадратическую ошибку каждой (Interagency Advisory Committee on Water Data, 1982). Подход, представленный Кучерой (Kuczera, 1982) и оцененный Леттенмайером и Поттером (Lettenmaier and Potter, 1985), основан на эмпирической Байесовской модели, которая объединяет местную и региональную изменчивость и существенно улучшает представление процедур, которые используют только локальную информацию.

Ясно, что региональная гидрологическая информация должна быть важна для улучшения оценок паводков, особенно принимая во внимание форму и характеристики хвоста распределения, поскольку их трудно повторно получить, используя ограниченные наборы локальных данных. По этой причине процедуры, применяемые для оценивания распределений повторяемости паводка во многих странах, используют некоторые сочетания асимметрии, среднего значения и стандартного отклонения. В некоторых случаях районирование только асимметрия, а региональная асимметрия усредняется вместе с локальной асимметрией. В Соединенном Королевстве основным методом определения риска паводка на водомерном посту является метод индекса паводков, который использует среднее для поста значение вместе с региональной кривой роста (Robson and Reed, 1999), таким образом, значение двух параметров подобранного логистического распределения определяется региональными данными.

Нахождение правильного баланса между использованием региональной информации и данных наблюдений на отдельном посту для определения кривой обеспеченности является трудной задачей. Понятно, что чем меньше данных есть на посту, тем меньше уверенности будет в оценках статистик этих данных, и тем большую роль будет играть региональная информация. Локальное среднеквадратическое отклонение может также быть усиленным региональным значением (Kuczera, 1982; Lettenmaier and Potter, 1985) или местное среднеквадратическое и стандартное отклонение можно использовать в качестве оценки региональной формы распределения (Lettenmaier and others, 1987).

Понятие области влияния подходит для определения наборов постов, используемых для объединения. Одним из возможных вариантов решения этой задачи является использование региональных процедур оценивания коэффициента вариации и асимметрии, основанных на различных пространственных масштабах усреднения в иерархическом подходе (Gabriele and Arnell, 1991) или регрессии для описания изменения кривой роста или параметра формы распределений характеристик бассейна (Madsen and Rosbjerg, 1997). Правильный выбор зависит от однородности или неоднородности района или других характеристик распределения паводков, длины ряда имеющихся наблюдений на различных постах и времени, которое есть у службы для того, чтобы определить и понять это потенциальное взаимное влияние. Стидингер и Лу (Stedinger and Lu, 1995) проиллюстрировали некоторые примеры такого влияния среди множества районированных параметров, длины ряда наблюдений и числа имеющихся станций, неоднородности района и характеристик распределения паводков.

5.9.6 Анализ повторяемости паводков и изменчивость климата

Предыдущее рассмотрение в большинстве случаев подразумевало традиционное предположение о том, что ряды паводков являются набором независимых и идентично распределенных случайных величин. Если они не полностью независимы, но имеют небольшую корреляцию от года к году, эта корреляция имеет относительно маленькое влияние на анализ и смещение оцениваемых квантилей паводков. Наиболее сложным в этом вопросе является тренд в распределении паводков из-за разработки водосбора и других его изменений, или тем, что обычно называется изменчивостью и изменением климата. Все три этих эффекта могут существенно влиять на риск возникновения паводка на данном водосборе.

Самым простым в применении из трех перечисленных факторов является эффект происходящих со временем изменений бассейна, в частности, из-за изменений поверхности земли, дренажной системы и характеристик каналов, или возведение или функционирование различных сооружений, осуществляющих задержку воды. Традиционные ряды максимальных годовых паводков оказываются неэффективными в описании риска паводков в новом режиме. Временной ряд зарегулированного стока, который может стать основой анализа повторяемости, можно получить при помощи традиционного метода отражения изменений в характеристиках каналов и работе водохранилищ, который заключается в отслеживании исторических рядов наблюдений за естественным стоком и дальнейшем генерировании зарегулированного стока при помощи гидравлической модели. В качестве альтернативного подхода можно выполнить анализ повторяемости естественного стока и построить гидрограф расчетного естественного стока как «выход» гидравлической модели, основываясь на предположении, что из-за работы гидротехнического сооружения вероятность превышения расчетного гидрографа останется неизменной, поскольку меньшие и большие события вызовут, соответственно, меньшие и большие пики паводков ниже по течению.

Для сложных систем, состоящих из нескольких водотоков или водохранилищ, или для водосборов, которые претерпели значительные изменения земельного покрова и землепользования, на входе физических моделей типа «дождевые осадки-сток» и гидравлических моделей рекомендуется использовать исторические или синтетические ряды данных наблюдений за дождевыми осадками и температурой. Такое исследование позволяет аналитику адекватно описать работу различных сооружений, изменения сети и русла, как и подобный эффект, вызванный изменением растительного покрова и землепользованием.

То, что связано с изменчивостью и изменением климата, является серьезной проблемой (Jain and Lall, 2001). Национальным исследовательским советом США (National Research Council, 1998) было сделано следующее наблюдение:

Накапливаются подтверждения тому, что климат изменялся, изменяется и продолжит изменяться независимо от наличия или отсутствия антропогенного воздействия. Следовательно, давно устоявшееся подразумеваемое допущение о том, что мы живем в относительно стабильной климатической системе, больше не является обоснованным.

Изменения гидроклиматологических переменных, как дождевых осадков, так и стока, в различных временных масштабах сейчас документально зафиксированы на постах во всем мире (Hirschboeck and others 2000; Pilon and Yue, 2002; Pekarova and others, 2003). Две проблемы предельно понятны — это изменчивость климата и его изменение.

Первая из них — изменчивость климата, связана с такими процессами, как Эль-Ниньо-Южное колебание или Северо-Атлантическое колебание, которые приводят к спорадической изменчивости риска паводков в масштабах десятилетия. В случаях, когда ряд наблюдений относительно длинный, можно надеяться, что эти явления воздействовали на гидрологический процесс в течение нескольких фаз, что дает надежную картину среднего многолетнего риска. С короткими рядами наблюдений такая изменчивость более проблематична. Всегда целесообразно использовать более длинные ряды наблюдений из этого же района для того, чтобы сбалансировать короткие ряды. Если совмещение или кросс-корреляция между короткими и более длинными рядами наблюдений надежны, можно использовать методы удлинения временных рядов, описанные в разделе 5.5.4, для разработки более сбалансированного долгосрочного описания риска паводка. Однако для маленького водосбора, где явления подвержены от года к году сильной изменчивости, использовать простое удлинение рядов для корректировки сильных различий в риске паводков между различными периодами может быть неэффективно, поскольку кросс-корреляция между следующими годовыми пиками будет слишком низкой.

С оперативной точки зрения, один из возможных путей решения проблемы заключается в прогнозировании явления Эль-Ниньо-Южное колебание или других индексов, а также необъясненных явлений гидрологической изменчивости с целью более точного прогнозирования риска паводков или половодий в текущих и последующие годы и выработки рекомендаций по управлению водными ресурсами (Piechota and Dracup, 1999). Однако для целей проектирования

гидротехнических сооружений такая краткосрочная изменчивость, по-видимому, слишком недолговечна, чтобы влиять на экономические расчеты проектируемого объекта.

Вторая климатическая проблема — это изменение климата в одном или другом направлении, которое не изменяется быстро в течение одного или двух десятилетий. Такое изменение климата в масштабе десятилетий требует серьезного рассмотрения. Как показано Парпарто и Ридофли (Porparto and Ridolfi, 1998) и Олсеном и др. (Olsen and others, 1999), даже пологие восходящие тренды могут перерасти в серьезный рост повторяемости паводков, превосходящих пороговые значения. Очевидно, что антропогенные воздействия сегодня неизбежны. Вопрос лишь в том, насколько быстро и насколько сильно они будут проявляться. Предоставить какое-либо руководство к действию в этом случае намного сложнее, поскольку ученые не пришли к консенсусу о том, как быстро на Земле может произойти повышение средней температуры вследствие выброса парниковых газов в атмосферу Земли, и как эти изменения будут влиять на метеорологические процессы в масштабе региона или водосбора. Обобщенные модели циркуляции атмосферы Земли дали некоторые представления о локальном изменении климата, но неспособность таких моделей описать текущие метеорологические процессы на региональном уровне или на уровне водосбора дают ограниченную уверенность в том, что они смогут точно предсказать скорость и интенсивность будущих изменений. Тем не менее, для получения представления о будущих изменениях часто разрабатываются гидрологические приложения разнообразных обобщенных моделей циркуляции (см. Arnell and others, 2001). И, как подчеркивает в своей работе Арнелл (Arnell, 2003), будущие изменения явятся результатами как естественной изменчивости климата, так и изменения климата.

5.10 **ОЦЕНИВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ ПАВОДКОВ** [ГОМС К10, К15, I81, K22]

5.10.1 **Общие положения**

Расчетный паводок представляется в виде гидрографа паводка или максимального мгновенного расхода, принимаемого при проектировании гидротехнического сооружения или регулирования стока реки с учетом экономических и гидрологических факторов. Это максимальный паводок, от которого защищен проектируемый объект; его выбор подразумевает также выбор критериев безопасности и оценивание величины паводка, который удовлетворяет выдвинутому критерию. Риск разрушения равноценен вероятности появления

паводков больших, чем расчетный паводок. При определении расчетного паводка решающим фактором является характерная особенность или параметр паводка, которые могут считаться основной причиной возможного разрушения. Решение о том, какой из параметров паводка является определяющим для каждого конкретного проекта, принимается планирующими или проектными организациями на основании инженерного анализа конкретной ситуации. Обычно основными параметрами расчетных паводков являются:

- a) максимальный расход за период паводка при расчетах переходов трубопроводов, мостовых переходов, водосливов и отверстий водосброса с малых плотин и дамб;
- b) максимальный уровень воды за период паводка при расчетах высоты берегоукрепительных сооружений, отверстий между опорами мостов, зон затопления, при проектировании шоссе и железных дорог в речных долинах;
- c) объем стока за паводок при проектировании противопаводочных водохранилищ и обычно для всех случаев стока, когда ослабление паводка за счет его аккумуляции в природном резервуаре может быть значительным, например при расчетах водопропускной способности водосливов и отметок водосбросов на плотинах;
- d) гидрограф паводочного стока в случаях, когда необходимо учитывать наложение нескольких паводков, например при проектировании систем защиты от паводка ниже устьев крупных притоков или при эксплуатации водохранилищ во время паводка.

5.10.2 Расчетные паводки

В практике гидротехнического строительства обычно рассматриваются следующие типы расчетных паводков (Singh, 1992):

- a) расчетный водосбросный паводок — этот термин часто используется при проектировании плотин для идентификации паводка, который должен пропускать водослив без серьезной угрозы разрушения плотины;
- b) строительный паводок — максимальный расход, по которому определяются соответствующие меры защиты от паводка на участках строительства в период возведения сооружений;
- c) максимальный возможный паводок — максимальный расход, который можно было бы ожидать на рассматриваемом участке при критическом сочетании всех сопутствующих факторов: условий местности, метеорологических, гидрологических и почвенных особенностей. Такой паводок, по существу, имеет бесконечно большой период повторяемости и может приниматься в качестве максимального расчетного паводка для обеспечения высокой степени безопасности сооружения;

- d) стандартный проектный паводок — паводок, формирующийся при наиболее неблагоприятном сочетании метеорологических и гидрологических условий, которые можно считать реальными для рассматриваемого района, исключая самое критическое сочетание этих условий. Такой паводок имеет большой, но не бесконечный период повторяемости, и может приниматься в качестве расчетного для сооружений высокого класса капитальности;
- e) паводок, основанный на повторяемости — паводок, определенный с помощью анализа повторяемости паводков или дождевых осадков, представляя один из следующих:
 - i) анализ повторяемости данных о дождевых осадках для оценки основанного на повторяемости расчетного ливня, который затем будет переведен в расчетный паводок;
 - ii) анализ повторяемости паводкового стока, имеющегося на посту, для прямой оценки расчетного паводка;
 - iii) региональный анализ повторяемости для прямого получения расчетного паводка.

5.10.2.1 Величина паводка и методы расчета

Расчетный паводок можно оценить, переводя расчетный ливень в расчетный паводок с помощью, например, концепции единичного гидрографа или анализа повторяемости паводков. Последний метод требует долгосрочных данных о потоке на рассматриваемом посту. Если таких данных нет или необходим гидрограф, то расчетный паводок можно оценить, используя и анализ повторяемости дождевых осадков, и модели «дождевые осадки–сток» или метод «дождевые осадки–сток», который может основываться на данных или быть гипотетическим или эмпирическим. Информация о дождевых осадках, используемая для оценки расчетного паводка, соотносится с расчетным ливнем и может быть классифицирована как максимально возможные осадки, стандартный проектный ливень или ливень, основанный на повторяемости. Для сооружений, риск повреждения которых невелик (дренажные трубы, второстепенные дороги), максимальный паводок может быть рассчитан с помощью эмпирических методов, исходя из обычно небольшого периода повторяемости максимального паводка и невысокой значимости таких сооружений. Для сооружений или проектируемых объектов, разрушение которых может привести к большому материальному ущербу, но без угрозы жизни населению, максимальный паводок должен рассчитываться, если это возможно, методами, позволяющими оценивать период повторяемости, необходимый для определения величины расчетного паводка на основе методов оптимизации. В случаях, когда разрушение сооружения связано с угрозой для жизни людей, необходимо предусмотреть максимальную защиту от разрушения, поэтому в качестве расчетного

принимается максимально возможный паводок или стандартный проектный паводок. Рекомендуется оценить надежность максимально возможного паводка, сравнивая его с наблюдаемыми дождевыми осадками и паводками.

В этой главе описаны только несколько из наиболее практичных и популярных методов расчета паводков. Существует много других методов, некоторые из которых были разработаны для конкретных районов, например, описанные Мэйдментом (Maidment, 1993) и Кунцевичем и др. (Kundziewicz and others, 1993). Например, метод GRADEX (Guillot, 1993; Ozga-Zielinski, 2002) основан на совместном использовании рядов наблюдений за дождевыми осадками и паводками. Он предполагает, что верхний хвост паводка лежит вблизи экспоненциальной асимптоты (градиента) дождевых осадков. *Flood Estimation Handbook* (Справочник по расчету паводков) предлагает метод, разработанный Центром экологии и гидрологии Соединенного Королевства, который объединяет статистический анализ и моделирование временных рядов осадков для гидрологического моделирования расхода по шкале водосбора (www.nerc-wallingford.ac.uk).

5.10.2.2 Период, на который проектируется сооружение, и критерий проектирования

Во многих случаях, когда расчетный паводок выбирается на основе оптимизации связи между ожидаемым ущербом от паводка и затратами на мероприятия по защите от него, оптимальная степень допустимого риска зависит в определенной мере от продолжительности периода эксплуатации проектируемого сооружения. Этот период называется долговечностью проектируемого сооружения или уровнем планирования и определяется на стадии планирования, исходя из следующих четырех временных интервалов:

- а) физический срок службы, который заканчивается, когда оборудование неспособно обеспечивать заданные функции из-за физического износа;
- б) экономический срок службы, который заканчивается, когда выгоды от продолжающейся эксплуатации сооружения становятся меньше затрат на поддержание его работоспособности;
- в) расчетный период — интервал времени, в течение которого ожидается, что оборудование будет выполнять свои функции в условиях, которые можно предвидеть во время проведения расчетов; работа сооружения в отдаленном будущем, условия которого имеют высокую степень неопределенности, исключается из рассмотрения;
- г) конструктивный срок службы, который достигается, когда объект больше не может отвечать будущим предъявляемым требованиям, становясь функционально устаревшим.

Оптимальный уровень расчетного риска и, следовательно, расчетная повторяемость паводка для каждого из этих периодов могут быть различными. Кроме того, при окончательном выборе расчетного паводка не могут не учитываться политические, социальные, природоохранные и другие количественно неопределяемые критерии.

Во многих случаях критерии анализа паводков часто предписаны правилами и не обсуждаются. Различные типы проектов могут требовать различных критериев, отражающих экономическую целесообразность и безопасность. Критерии безопасности могут быть определены в отношении периода повторяемости, вклада метеорологического фактора и/или максимального паводка в ряду наблюдений. Период повторяемости (T лет) часто указывается компетентной службой и может быть связан с риском (R) или вероятностью ошибки (проценты) в течение срока службы (n лет), как показано в $T = 1/[1 - (1-R)^{1/n}]$ (см. раздел 5.10.8).

Например, когда $n = 2$ и приемлемый риск $R = 0,02$ процента, то $T = 99,5$ лет. Необходимо четко различать определение критериев, которым нужно соответствовать, и определение методов расчета, которые должны использоваться для оценивания расчетного паводка. Когда метод расчета не определен правилами, его должен выбрать и оценить разработчик. Рекомендуется убедиться в соответствии расчетов заданным условиям и цели проекта.

5.10.2.3 Расчетные паводки для больших водохранилищ

При проектировании водосливов плотин больших водохранилищ выбору расчетного паводка должно быть уделено особое внимание, поскольку водохранилище может существенно изменять паводковый режим как в границах зоны затопления, так и на ниже-расположенных участках реки.

Основной эффект водохранилища в отношении паводка — его ослабление. Оценивание регулирующего влияния водохранилищ требует сведений о первоначальной форме гидрографа паводкового стока. При отсутствии таких сведений допускается гипотетическая форма, часто треугольная, гидрографа, на основании которого определяется объем стока и максимальный расход. При оценивании возможности снижения пропускной способности водослива и высоты надводной части плотины за счет эффекта снижения паводка водохранилищем крайне необходимо применять взвешенные подходы и рассматривать только те эффекты, которые могут быть гарантированы в течение всего периода эксплуатации водохранилища. Например, оценивание влияния водослива без затвора следует выполнять, предполагая, что все водопропускные

отверстия с затворами закрыты, а водохранилище заполнено до отметки гребня беззатворных водосливов к моменту начала паводка.

Кроме оценивания ослабляющего влияния на паводок, следует провести тщательный анализ паводкового режима в нижнем бьефе с точки зрения изменений во времени прохождения максимальных расходов, форм гидрографов паводков, а также влияния на эрозионные процессы в русле вследствие осветления сбрасываемой через водосливы воды.

Также должен быть рассмотрен тип конструкции плотины, поскольку он имеет огромное значение при оценке устойчивости плотины в случае перелива воды через ее гребень. Наименее устойчивыми в этом плане являются насыпные земляные плотины, которые обычно разрушаются при переливе воды через гребень.

5.10.2.4 Максимально возможный паводок

Максимально возможный паводок рассчитывается по величине максимально возможных осадков (см. раздел 5.7) или исходя из самого критического сочетания максимальной интенсивности снеготаяния и максимально возможных дождевых осадков, которые могут выпасть в период наиболее интенсивного таяния снега (см. раздел 6.3.4), что дает обозначение максимально возможного паводка, который может ожидаемо случиться на данном водосборе. Невозможно количественно оценить значение или определить длинный, но случайный период повторяемости для максимально возможного паводка. Понятия о максимально возможных осадках и максимально возможном паводке являются спорными. Тем не менее, они необходимы для оценивания потенциального воздействия таких экстремальных явлений, поэтому численные оценки паводков требуются для очень экстремальных паводков и часто используются в расчетной практике.

Максимально возможные осадки аналитически оцениваются как наибольший слой осадков за данную продолжительность, т. е. физически вероятные на данном водосборе в конкретное время года, и их оценка включает временное распределение дождевых осадков. Эти понятия и соответствующие методы описаны ВМО (1996a). В распоряжении Инженерного корпуса армии США (The US Army Corps of Engineers, 1985) имеется компьютерная программа HRMS2, предназначенная для расчета максимально возможных осадков, которая может быть также использована вместе с программой HEC-1 (см. раздел 5.10.5) для определения максимально возможного паводка. Дополнительные подробности об оценивании максимально возможных паводков предоставлены ВМО (1969) (см. также раздел 6.3.2).

Поскольку дождевые осадки обычно дают основной вклад в максимально возможный паводковый сток, вопрос о преобразовании дождевых осадков в сток должен рассматриваться специально. Такое преобразование выполняется с помощью детерминированных моделей «дождевые осадки–сток», но их применение для этой цели требует учета определенных особенностей, обуславливающих формирование экстремального количества дождевых осадков, которые используются в качестве входа модели. Наиболее важными являются следующие особенности:

- a) влияние на сток начального увлажнения почвы и изменения скорости инфильтрации во время выпадения дождевых осадков намного ниже в сравнении с эффектом влияния этих факторов в нормальных условиях. Следовательно, методы, применяемые в большинстве моделей для оценки инфильтрации, могут быть значительно упрощены. Обычной практикой является использование показателя наименьшей влагоемкости или максимального коэффициента стока, характерного для данного типа почв и растительного покрова в течение всего периода выпадения осадков, формирующих паводок;
- b) если для преобразования максимальных осадков в сток используется метод единичного гидрографа, следует помнить, что надежность принятых допущений и линейности ограничивается теми условиями, для которых единичный гидрограф был получен. Анализ паводков, выполненный для ряда речных бассейнов (Singh, 1992), показал, что максимальные ординаты единичных гидрографов, полученные для больших паводков (более 125 мм слоя стока по всему бассейну), часто оказывались на 25–50 процентов выше, чем максимальные ординаты, полученные для умеренных паводков (25–50 мм стока). Поэтому важно иметь в виду, что при подборе единичного гидрографа для расчета максимально возможных паводков следует руководствоваться необходимостью использования неоднократно проверенных методов оценки, т. е. тех методов, которые позволяют получить больший паводок;
- c) для водосборов с площадями более 500 км² или даже меньших речных бассейнов, если их отдельные части имеют существенно различные характеристики стока, обычно необходимо определять отдельные единичные гидрографы и максимально возможные паводки для каждого участка водосбора, а затем получать максимально возможные паводки для всего бассейна, последовательно рассчитывая трансформацию компонентов паводков вниз до створа проектирования. Необходимо помнить, что аналогичное положение складывается при применении метода изогийет для определения расчетного ливня по водосбору, который дает максимальный паводок, если единичный гидрограф

получен для всего водосбора, но неприменим для расчета максимального паводка, если водосбор подразделен на несколько участков. Таким образом, для каждого участка водосбора оптимальная методология оценивания расчетного ливня, т.е. методология, позволяющая учесть самые неблагоприятные сочетания факторов формирования максимально возможного паводка, должна выбираться индивидуально с учетом ороеграфии водосбора, о чем говорилось в разделе 5.7. Оптимальное местоположение зоны осадков может быть получено в результате анализа чувствительности модели.

Несмотря на то, что для максимально возможного паводка период повторяемости может специально не определяться, полученные параметры максимально возможного паводка должны сравниваться с соответствующими параметрами кривых вероятностного распределения, полученных по данным фактических наблюдений. Это позволяет убедиться в том, что они имеют существенно более редкую повторяемость, выходящую за пределы наблюдаемых паводков.

5.10.2.5 Стандартный проектный паводок

Стандартный проектный паводок обычно составляет около 50 процентов от максимально возможного паводка (Singh, 1992). При его определении руководствуются теми же правилами, что и при определении максимально возможного паводка. Стандартный проектный паводок обычно определяется посредством преобразования наибольшего наблюдаемого ливня в районе, прилегающем к объекту проектирования, а не по максимально возможному ливню как метеорологическому явлению, что рекомендуется в случае определения максимально возможного паводка. Несмотря на это, стандартный проектный паводок должен представлять крайне редкое событие и не может быть превышен более чем на несколько процентов по сравнению с выдающимися паводками, наблюдаемыми в пределах всего рассматриваемого района.

5.10.3 Подготовка данных

Основными данными для определения расчетных паводков являются данные наблюдений, собранные региональными или национальными гидрологическими и метеорологическими службами. Эти данные существуют в виде записей уровней и измерений расходов, которые являются основой для расчета кривых расходов. Поскольку величина расчетного паводка зависит главным образом от измерений максимальных расходов, следует уделять особое внимание их оцениванию и обобщению кривых расходов.

Для получения правильной оценки режима паводкового стока важно получить достаточную информацию с историческими данными о паводках. Особую ценность в составе такой информации представляют данные об уровне. При сборе информации о максимальных уровнях могут быть использованы следы материалов, отложенных паводками, отметки уровней высоких вод (УВВ) на мостах, строениях, берегах рек, имеющиеся материалы, опубликованные статьи и мемуары. Можно также рассматривать информацию о доисторических паводках (Viessman and Lewis, 2003).

Для того чтобы перейти от полученных таким образом сведений об уровнях к расходам воды, следует провести гидравлические расчеты, основанные на восстановленных поперечных сечениях реки, продольных профилях, уклонах водной поверхности и коэффициентах шероховатости русла. Должны быть приняты во внимание все известные преобразования речного русла, например дноуглубление, крепление берегов, спрямление русла. Вследствие ограниченной точности восстановленных характеристик речного русла, удовлетворительные результаты при проведении гидравлических расчетов такого рода обычно получаются при применении формулы Шези-Маннинга. Анализ может облегчить программное обеспечение, например HEC-RAS.

5.10.4 Методы определения расчетного паводка

Выбор метода для определения расчетного паводка зависит от вида, количества и качества имеющихся гидрологических данных, а также от типа информации о расчетном паводке. Поскольку процессы, вызывающие паводки, сложные, их оценки являются только приближениями, и для получения надежных оценок важно понимание существующих взаимосвязей. Существует много методов, и выбор конкретного метода чаще производится субъективно и интуитивно. Некоторые практические критерии выбора можно найти в работе Пилгрима и Дорана (Pilgrim and Doran, 1993), а подробности некоторых методов — в трудах Пилгрима и Кордери (Pilgrim and Cordery, 1993), Бедьена и Юбера (Bedient and Huber, 2002) и Вессмана и Льюиса (Viessman and Lewis, 2003).

В зависимости от наличия данных и расчетных требований все методы определения расчетных паводков можно разделить на эмпирические, основанные на повторяемости, и отражающие соотношение «дождевые осадки–сток».

Для того чтобы извлечь максимум информации из недостаточных или неточных данных, целесообразно применять несколько различных методов, сравнивать результаты, а затем выбирать расчетные параметры,

основываясь на инженерном подходе. Сравнительный анализ может быть полезным при принятии окончательного решения, поскольку он позволит выявить влияние возможных погрешностей на величину расчетного параметра.

5.10.4.1 Эмпирические методы

Эмпирические формулы паводка, выраженные как огибающие кривые, можно использовать для получения грубых оценок верхнего предела расхода для данного поста. Общий тип формулы, выражающей максимальный расход Q ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) в виде степенной функции площади водосбора A (км^2) (Bedient and Huber, 2002), имеет следующий вид:

$$Q = CA^n, \quad (5.53)$$

где коэффициент C и показатель степени n меняются в широких пределах, и их значения для частных случаев определяются на основе эмпирических данных.

Применение эмпирических формул обычно ограничивается тем районом, для которого они были разработаны, поэтому их следует использовать с большой осторожностью и только тогда, когда нельзя применить более точный метод. Другой недостаток эмпирических формул — трудность оценивания периода повторяемости, полученного на их основе.

Максимальные паводковые расходы, наблюдаемые по большому числу станций, могут быть нанесены на клетчатку как функция площади водосбора, и полученное поле точек огибается сглаженной кривой. Такие кривые несут полезную информацию, особенно в случае, когда по каждой отдельной станции имеются ограниченные выборки. Ранее уже предпринимались попытки разработать методику построения различных огибающих кривых применительно к разным климатическим и геоморфологическим факторам. Однако общим недостатком метода огибающих кривых является неопределенность периода повторяемости полученных максимальных расходов. Использование таких формул дает грубые оценки, позволяя узнать только порядок величины паводкового стока.

5.10.4.2 Модели типа «дождевые осадки–сток»

В зависимости от того, как моделируется расчетный паводок — на основании данных об осадках и/или условиях снеготаяния, или на основании известных гидрографов паводка, полученных для вышерасположенного створа, — детерминированные модели разделяются на две большие группы:

- a) модели «дождевые осадки–сток», которые описаны в разделе 6.3.2;
- b) модели трансформации речного стока, которые описаны в разделе 6.3.5.

К настоящему времени были разработаны многие взаимосвязи между дождевыми осадками и стоком, которые могут применяться для любого района или водосбора при любом наборе условий. Однако эти методы нужно использовать осторожно, поскольку они являются приблизительными и эмпирическими. Наиболее широко применяются метод единичного гидрографа (см. раздел 6.3.2.3), рациональный метод (см. ниже), метод Службы охраны почв США (см. ниже) и концептуальные модели (см. раздел 5.10.5).

5.10.4.2.1 Рациональный метод

Одним из самых старых и простых уравнений типа «дождевые осадки–сток» является рациональная формула, которая используется для предсказания пика расхода воды Q_p ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$):

$$Q_p = 0,278CiA, \quad (5.54)$$

где C — коэффициент стока (безразмерный), он выбран в зависимости от типа землепользования в водосборе, i — интенсивность осадков (мм/ч) выбранной повторяемости и для продолжительности, равной времени рассмотрения, A — это площадь водосбора (км^2). Этот метод применяется для получения грубых оценок, как для урбанизированных территорий, так и для сельской местности, при отсутствии данных для использования других методов. Он очень чувствителен к предположению о количестве дождевых осадков и выбору коэффициента C . Этот метод должен использоваться ограниченно; хотя верхний предел явно не установлен, он изменяется от 40 до 500 га.

Поскольку рациональный метод широко применяется для анализа городских территорий, он более подробно рассмотрен в разделе 4.7.

5.10.4.2.2 Метод Службы охраны почв США

Бывший Департамент сельского хозяйства и защиты почв США, ныне Национальная служба охраны природных ресурсов, предложила эмпирическую модель потерь атмосферных осадков, основанную на способности почв поглощать определенное количество влаги. На основе полевых наблюдений определяется потенциальный запас почвенной влаги S , который соотносится с номером кривой CN, изменяющимся от 0 до 100, что является характеристикой типа почвы, землепользования и начального уровня насыщения, известного как индекс предшествующего увлажнения (AMC). Величина S выражается эмпирическим соотношением:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \text{ (миллиметры)}. \quad (5.55)$$

Значения CN приведены в таблице II.5.8 как функции типа почв (A,B,C,D), землепользования, гидрологических условий водосбора и индекса предшествующего увлажнения (AMC I, II, III).

В соответствии с этим методом глубина поверхностного стока определяется следующим уравнением:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}, \quad (5.56)$$

где Q — глубина поверхностного стока, P — аккумулятивный слой дождевых осадков, I_a — начальные потери осадков: сток отсутствует до момента, пока накопленные дождевые осадки не превысят значение I_a , и S — потенциальный запас влаги в почве.

Все величины измеряются в миллиметрах и представлены для значений $P > I_a$. Рассмотрев данные полевых наблюдений, Национальная служба охраны природных ресурсов обнаружила, что I_a связано с S и среднее значение принимается равным $I_a = 0,2S$; следовательно, уравнение принимает вид:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (5.57)$$

для $P > 0,2S$ и $Q = 0$, если $P \leq 0,2S$. Поскольку начальная абстракция предполагает задержание, понижение и инфильтрацию перед прямым стоком, то значение I_a может меняться в зависимости от местных условий.

Почвы классифицируются по группам на А, В, С и D по следующим критериям:

- почвы группы А имеют низкий потенциал стока и высокие скорости инфильтрации, превышающие 7,6 мм/ч и состоящие в основном из песков и гравия глубокого залегания, обладающих высокой способностью инфильтрации;
- почвы группы В обладают средними скоростями инфильтрации (3,8–7,6 мм/ч) и состоят в основном из мелко- и крупнозернистых почв, таких как лёсс и песчаный суглинок;
- почвы группы С обладают низкими скоростями инфильтрации (1,27–3,8 мм/ч) и состоят из глинистого суглинка, приповерхностного песчаного суглинка и глин;
- почвы группы D имеют высокий потенциал стока и низкие скорости инфильтрации (меньше чем 1,27 мм/ч) и состоят преимущественно из глин с большим потенциалом набухания, почвы с постоянным высоким водным зеркалом или приповерхностных почв, состоящих из практически водонепроницаемых материалов.

Для урбанизированных территорий и территорий со смешанным типом землепользования необходимо определять значения CN .

Сток от конкретного дождя зависит от содержания в почве влаги, полученной от предыдущих дождевых осадков. Тремя индексами предшествующего увлажнения являются следующие:

- AMC I — почвы сухие, но не достигающие точки завядания;
- AMC II — средние условия;
- AMC III — выпал сильный ливень или небольшие дождевые осадки с низкой температурой, насытившие почву за последние 5 дней.

В таблице II.5.8 приведены значения CN (II) для средних условий AMC II. $CN(I)$ и $CN(III)$, соответствующие AMC (I) и AMC (II), можно оценить с помощью уравнений:

$$CN(I) = 4,2CN(II) / (10 - 0,058CN(II)) \quad (5.58)$$

и

$$CN(III) = 23CN(II) / (10 + 0,13CN(II)). \quad (5.59)$$

5.10.4.2.3 Единичный гидрограф Службы охраны почв

Самый простой метод Службы охраны почв предполагает, что гидрограф — это простой треугольник, как показано на рисунке II.5.12, с продолжительностью дождевых осадков D (час), временем до пика TR (часы), временем выпадения B (часы) и пиковым расходом Q_p ($m^3 \cdot c^{-1}$), данными в следующем уравнении (Bedient and Huber, 2002):

$$Q_p = \frac{0,208 A Q_R}{T_R}, \quad (5.60)$$

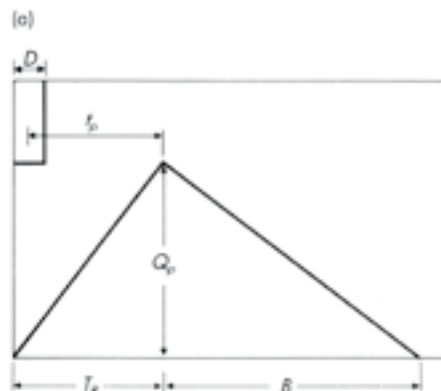


Рисунок II.5.12. Треугольный единичный гидрограф

Таблица II.5.8. Номера кривых стока для выбранных типов сельскохозяйственного, пригородного и городского землепользования (AMCII и $I_a = 0,25$) (Bedient and Huber, 2002)

Описание типа землепользования	Гидрологическая группа почвы			
	A	B	C	D
Обработанная земля ^a				
Без противозерозионной обработки	72	81	88	91
С противозерозионной обработкой	62	71	78	81
Пастбище или природное пастбище				
Плохое состояние	68	79	86	89
Хорошее состояние	39	61	74	80
Луг				
Хорошее состояние	30	58	71	78
Лес или лесные угодья				
Редкий травостой, скудный покров, отсутствие мульчи	45	66	77	83
Хороший покров ^b	25	55	70	77
Незастроенные территории: лужайки, парки, поля для гольфа и т. д.				
Хорошее состояние: травяной покров = 75 % или больше	39	61	74	80
Довольно хорошее состояние: травяной покров = 50–75 %	49	69	79	84
Коммерческие и деловые области (непроницаемые 85 %)	89	92	94	95
Индустриальные районы (непроницаемые 72 %)	81	88	91	93
Жилые районы ^c				
Средний размер лота	Среднее непроницаемого ^d (%)			
1/8 акра ^e или меньше	65			
1/4 акра	38			
1/3 акра	30			
1/2 акра	25			
1 акр	20			
Асфальтированные стоянки для автомобилей, крыши, дороги и т. д. ^f	98	98	98	98
Улицы и дороги				
Асфальт с ограждениями и колодцами ливневой канализации ^f	98	98	98	98
Гравий	76	85	89	91
Грязь	72	82	87	89

^a Для более детального описания сельскохозяйственных значений характеристики использования земель просьба обращаться в *National Engineering Handbook* (Национальное руководство по инжинирингу) (Natural Resources Conservation Service, 1972).
^b Хорошее покрытие защищено от выпаса и мусора и зарастания кустарником.
^c Номера кривых вычислены, исходя из предположения, что сток от домов и дорог направлен к улице с минимумом воды с крыш, стекающей на лужайки, где могла произойти дополнительная инфильтрация.
^d Предполагается, что для этих значений характеристики оставшихся проницаемых поверхностей (лужайки) находятся в хорошем состоянии.
^e 1 га = 0,404687 акра.
^f В некоторых районах страны с более теплым климатом может использоваться кривая номер 95.

где A — площадь водосбора (км^2) и Q_R обозначает глубину стока для расчета единичного гидрографа (мм). Рисунок II.5.12 показывает время до пика (часы) в следующей форме:

$$T_R = D/2 + t_p, \tag{5.61}$$

где D — продолжительность осадков (в часах) и t_p — время отклика водосбора (в часах) на дождевые осадки (соответствует времени добегания от центра пятна выпавших осадков до Q_p ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$)). Время запаздывания t_p оценивается с помощью любого из нескольких эмпирических уравнений, используемых Службой охраны почв, таких как:

$$t_p = \frac{l^{0,8} (S + 1)^{0,7}}{1900y^{0,5}}, \tag{5.62}$$

где l — расстояние до границы водосбора (в футах), y — средний уклон водосбора (%), а параметры S и CN получаются из таблицы II.5.7. Время отклика водосбора (t_p) применяется к значениям CN между 50 и 95 и площади водосбора меньше 8 км^2 . Для городских территорий t_p должен быть скорректирован с учетом водонепроницаемости. Коэффициент 0,208 в уравнении (5.60) — это среднее значение для многих водосборов. Его можно уменьшить на 30 процентов для плоских или болотистых водосборов или увеличить на 20 процентов для водосборов с крутыми склонами. Когда вводятся такие поправки, единичный гидрограф также должен быть соответственно скорректирован.

Для оцененных Q_p и t_p единичный гидрограф можно изобразить графически и/или представить в виде таблицы, используя безразмерный единичный гидрограф,

показанный в таблице II.5.9. Музик и Чанг (Muzik and Chang, 2003) разработали региональный безразмерный единственный гидрограф.

Метод Службы охраны почв широко используется (Vuczkowski, 1996; Maidment, 1993) из-за своей простоты, полной доступности информации о водосборе, удобства применения и в связи с тем, что он дает адекватные результаты. Однако результаты исследований, в которых сравнивались прогнозы с полученными данными измерений, смешались (Dingman, 2002), поэтому этот метод нужно использовать с осторожностью.

5.10.5 Концептуальные модели гидрографа паводков

Недавние достижения компьютерных технологий и развитие теоретической гидрологии кардинально изменили форму представления вычислений. Гидрологические модели позволяют верифицировать параметры в пространстве и времени, использовать данные дистанционного зондирования и применять географические информационные системы. Новые компьютерные технологии, такие как электронные таблицы, базы данных и графические возможности, повышают гибкость процедур ввода данных.

Список некоторых наиболее широко используемых из разработанных моделей включает:

- а) HEC-1, которая была разработана и поддерживается Центром гидрологического инжиниринга Корпуса инженеров армии США (www.hec.usace.army.mil). Эта модель представляет водосбор как ряд гидравлических и гидрологических компонентов и рассчитывает сток от одного ливня. Пользователь может выбирать из разнообразия подмоделей, которые моделируют осадки, инфильтрацию и сток, а так же из многообразия методов представления стока. В эту модель также входит безопасность дамб и анализ ошибок и повреждений от паводков, а также блок по оптимизации параметров. Недавние усовершенствования включают в себя рассмотрение радиолокационных данных о дождевых осадках как входных данных и использование географической информационной системы и инструментов картирования (HEC-GeoRAS) для трактовки результатов вычислений и манипулирования данными;
- б) модели SCS-TR 20 (для сельскохозяйственных водосборов) и SCS-TR55 (для городских территорий)

были разработаны и поддерживаются Национальной службой охраны природных ресурсов, Министерством сельского хозяйства США. Эти составные модели используют метод номера кривой (CN) для расчета гидрографа стока, получающегося из единичного ливня с отдельных ячеек водосбора и проходящего через дренажные системы и водохранилища;

- с) модель SWMM была разработана и поддерживается Агентством по охране окружающей среды (www.epa.gov/cdnnrml/models/swmm). Эта модель состоит из модуля стока, транспортного модуля и модуля хранения/восстановления стока. Она моделирует количество и качество стока, пути канализационных стоков, рассчитывает гидравлический напор, эффекты истощения бассейнов и их переполнения. Это наиболее полная модель для рассмотрения городского стока.

Безусловно, есть и другие хорошие модели, которые могут справиться с этими задачами. Способности моделей могут быстро меняться и, следовательно, рекомендуется актуализировать информацию с помощью сайтов разработчиков разнообразных моделей. Ссылки на другие популярные модели: www.wallingfordsoftware.com, www.dhi.dk, http://water.usgs.gov/software/lists/surface_water и www.haested.com.

Все модели, описанные выше, могут просчитываться на микрокомпьютерах, и некоторые модели защищены патентами. Бедьен и Юбер (Bedient and Huber, 2002) приводят более полный список интернет-источников компьютерных моделей, но, конечно, в ближайшие годы появится еще больше моделей.

5.10.6 Вклад снеготаяния в паводок

В некоторых районах мира паводки вызываются сочетанием снеготаяния и стока дождевых осадков или только снеготаянием. Факторы, влияющие на вклад снеготаяния в паводки, включают в себя накопленный к моменту таяния слой снега, ледяные заторы, запасы бассейна и период повторяемости изучаемого явления. Синтез гидрографов стока, связанного со снеготаянием, требует эмпирических уравнений, поскольку снеготаяние нельзя измерить непосредственно.

После оценивания слоя в результате таяния снега, его можно расценивать как дождевые осадки и переводить

Таблица II.5.9. Ординаты безразмерного единичного гидрографа Службы охраны природных ресурсов США

t/T_R	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,4	4,6	5,0
Q/Q_p	0	0,310	0,930	0,930	0,560	0,280	0,147	0,077	0,029	0,003	0,000

в потоковое течение посредством применения метода единичного гидрографа или метода расчета трансформации. Такие методы не дают возможности рассчитать вероятность паводка. Сравнение нескольких моделей снеготаяния–стока приведено в ВМО (1986b). Существует несколько оперативных моделей, которые включают в себя процедуру расчета снеготаяния, в том числе модель HEC-1 (USACE, 1985).

5.10.7 Расчет стока из городских дренажных систем

Городская гидрология рассматривается, главным образом, с точки зрения предсказания пиков стока, объемов и полных гидрографов в любой части системы. Решение проблем, обозначенных выше, требует различных аналитических методов. Объемы пиковых значений можно получить при помощи упрощенных методов, таких как рациональный метод (см. раздел 5.10.4.2.1), в то же время гидрологи требуют более полного анализа, в том числе с использованием метода Национальной службы охраны природных ресурсов (см. раздел 5.10.4.2.2) или компьютерных моделей (см. 5.10.5). Городские дренажные системы более подробно рассмотрены в разделе 4.7.

5.10.8 Риск

Опасность возникновения аварийной ситуации определяется вероятностью того, что расчетный паводок будет превышен хотя бы раз, а вероятность того, что расчетный паводок не будет превышен, является показателем надежности. Одним из главных вопросов при генерировании расчетного паводка является оценка рисков, связанных с возникновением более высоких паводков, чем расчетный паводок. Осведомленность о таких рисках имеет большое значение ввиду их социальных, экологических и экономических аспектов, например при определении ставок страховой премии при страховании от паводков, при оценке зон затопления или контроле качества воды. Поскольку паводки являются вероятностным явлением, их величина и время появления в будущем не могут быть предсказаны. Существует только возможность оценить их на вероятностной основе, т. е. получить оценку вероятности того, что паводок данной величины будет превышен в течение определенного периода времени. Переменная, вероятность превышения которой равна p , имеет период повторяемости $T = 1/p$.

Руководящие материалы по анализу повторяемости в целом представлены в разделе 5.3 и, в частности, по анализу повторяемости паводков в разделе 5.9.

Полная процедура оценки риска стихийных бедствий дана в работе *Comprehensive Risk Assessment for Natural Hazards* (Комплексное оценивание рисков природных катастроф)(WMO/TD-No. 955).

Вероятность превышения заданной величины явления, полученная по модели вероятностного распределения, приписывается каждому будущему явлению. Таким образом, если рассматривается серия максимальных годовых паводков, то вероятность превышения p характеризует риск того, что данное значение величины паводка будет превышено в каком-либо одном году. Однако часто возникает необходимость определения вероятности p_n того, что данное явление, например превышение отдельного максимального паводкового расхода, произойдет, по крайней мере, однажды за n число лет, например в течение расчетного срока эксплуатации сооружения. Если предположить, что ежегодные паводки являются независимыми событиями, то такая вероятность рассчитывается по формуле:

$$p_n = 1 - (1 - p)^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n, \quad (5.63)$$

где T — период повторяемости. Это измерение риска дает более точное вероятностное обозначение потенциальной неудачи расчета, которая кратко изложена в методологии периода повторяемости. Риск того, что явление произойдет, по крайней мере, один раз за его период повторяемости, определяется из уравнения (5.63) при $n = T$. При большом значении T степень риска приближается к асимптотической величине:

$$1 - e^{-1} = 0,63. \quad (5.64)$$

Из уравнения (5.63) можно получить выражение для T в виде функции n и p_n , т. е. рассчитать период повторяемости таким образом, чтобы риск повторения явления в течение n лет имел бы заданную вероятность p_n . Этот период повторяемости называется расчетным периодом повторяемости T_d и определяется по формуле:

$$T_d = 1/[1 - (1 - p_n)^{1/n}]. \quad (5.65)$$

Некоторые значения переменных T_d , n и p_n показаны в таблице II.5.10. Для того чтобы пояснить ее использование, предположим, что расчетный срок службы проектируемой плотины составляет 50 лет и что проектировщики задают только 10 процентов риска того, что плотина будет подвержена переливу воды в течение этого периода. Следовательно, при $n = 50$, $p_n = 0,10$ плотина должна быть спроектирована таким образом, чтобы выдержать паводок, период повторяемости которого $T_d = 475$ лет, т. е. вероятность превышения $p = 1/T_d \approx 0,2$ процента.

Таблица II.5.10. Необходимый проектный период повторяемости T_d события, вероятность наступления которого в течение n -лет = p_n

p_n	n -лет			
	2	10	50	100
0,01	199,0	995,0	4 975,0	9 950,0
0,10	19,5	95,4	475,0	950,0
0,50	3,4	14,9	72,6	145,0
0,75	2,0	7,7	36,6	72,6

Ссылки и дополнительная литература

- Adamowski, K., 1981: Plotting formula for flood frequency, *Water Research Bulletin*, Vol. 17, No. 2.
- Adamowski, K., 1985: Nonparametric kernel estimation of flood frequencies, *Water Resources Research*, 21(11): 1585–1590.
- Adamowski, K., 1989: A Monte Carlo comparison of parametric and nonparametric estimation of flood frequencies, *Journal of Hydrology*, 108: 295–308.
- Adamowski, K., 1996: Nonparametric Estimation of Low-Flow Frequencies, *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 122: 46–49.
- Adamowski, K., Y. Alila and P.J. Pilon, 1996: Regional rainfall distribution for Canada, *Atmospheric Research*, 42, 75–88.
- Akaike, H. 1974: A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE transactions on automatic control*, AC-19(6): 716–723.
- American Society of Civil Engineers, 1996: *Hydrology Handbook*, Second Edition, ASCE Manual and Reports on Engineering Practice No. 28, New York, 784 pp.
- Arihood, L.D. and D.R. Glatfelter, 1986: *Method for estimating low-flow characteristics for ungaged streams in Indiana*, US Geological Survey Open-File Report 86–323.
- Arihood, L.D. and D.R. Glatfelter, 1991: *Method for estimating low-flow characteristics for ungaged streams in Indiana*, US Geological Survey Water-Supply Paper 2372, 18 pp.
- Arnell, N.W., 2003: Relative effects of multi-decadal climate variability and change in the mean and variability of climate due to global warming: future streamflows in Britain, *Journal of Hydrology* 270, 195–213.
- Arnell, N.W., C. Liy, R. Compagnucci, L. da Cunha, K. Hanaki, C. Howe, G. Mailu, I. Shikomanov, E. Stakhiv, *Hydrology and Water Resources*, In: J.J. McCarthy, O. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White (eds.), 2001: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptations, and Vulnerability. Contribution of the Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 191–233.
- Arnell, V., P. Harremoes, M. Jensen, N.B. Johansen and J. Niemczynowicz, 1984: *Review of rainfall data application for design and analysis*, *Water Science and Techn.*, 16, pp. 1–45.
- Asselin, J., T.B.M.J. Ouarda, V. Fortin and B. Bobée, 1999: *Une procédure Bayésienne bivariée pour détecter un décalage de la moyenne*. INRS-Eau, Rapport de Recherche R-528, 35 pp.
- Bedient, P. B. and W. C. Huber, 2002: *Hydrology and Floodplain Analysis*, Prentice Hall, Inc. New Jersey, USA.
- Benson, M.A., 1962: Factors affecting the occurrence of floods in the south-west. US Geological Survey Water-Supply Paper 1580-D, Reston, Virginia.
- Beran, M., J.R.M. Hosking and N. Arnell, 1986: Comment on “Two-Component Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analysis”, *Water Resources Research* 22(2), 263–266.
- Bingham, R.H., 1982: *Low-flow characteristics of Alabama streams*, US Geological Survey Water-Supply Paper 2083, 27 pp.
- Bobée, B. and F. Ashkar, 1991: *The gamma family and derived distributions applied in Hydrology*. Water Resources Publications, Littleton, CO, 203 pp.
- Box, G.E.P. and G.C. Tiao, 1973: *Bayesian inference in statistical analysis*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Bras, R. and I. Rodriguez-Iturbe, 1985: *Random functions in hydrology*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Burn, D.H., 1990: Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research*, 26(10): 2257–2265.
- Byczkowski, A, 1996: *Hydrology* (in Polish), Wydawnictwo SGGW (Poland).
- Carpenter, D.H. and D.C. Hayes, 1996: Low-flow characteristics of streams in Maryland and Delaware, US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 94–4020, 113 pp.
- Carswell, W.J. and S.V. Bond, 1980: Multiyear low flow of streams in northeastern Kansas, US Geological Survey Open-File Report 80–734, 26 pp.
- Cavadias, G.S., 1990: The canonical correlation approach to regional flood estimation. In M. A. Beran, M. Brilly, A. Becker and O. Bonacci (eds.), *Proceedings of the Ljubljana Symposium on Regionalization in Hydrology*, IAHS Publ. No. 191: 171–178. Wallingford, England.
- Chow, V.T., 1964: *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Chowdhury, J.U., J.R. Stedinger and L-H. Lu, 1991: Goodness-of-fit tests for regional GEV flood distributions, *Water Resources Research* 27(7), 1765–1776.
- Clarke, R.T., 1994: *Statistical Modelling in Hydrology*, John Wiley and Sons, Chichester, England.
- Cluckie, I.D., P.P. Ede, M.D. Owens and A.C. Bailey, 1987: Some Hydrological Aspects of Weather Radar Research in the United Kingdom, *Hydrological Sciences Journal*, 32, 3, 9, pp. 329–346.
- Cluckie, I.D. and M.L. Pessoa 1990: Dam Safety: An Evaluation of Some Procedures for Design Flood Estimation, *Hydrological Sciences Journal*, 35(5), pp. 547–569.
- Cohn, C.A., W.L. Lane and J.R. Stedinger, 2001: Confidence Intervals for EMA Flood Quantile Estimates, *Water Resources Research*, 37(6), 1695–1706.
- Collier, C.G., 1993: Estimating Probable Maximum Precipitation (PMP) Using a Storm Model and Remotely-sensed Data, British Hydrological Society 4th National Hydrology Symposium, Cardiff, September 13–16, *Institute of Hydrology*, pp. 5.33–5.38.
- Condie, R. and L.C. Cheng, 1982: *Low Flow Frequency Analysis Program LOFLOW*, Inland Waters Directorate, Water Resources Branch, Environment Canada.

- Condie, R. and G.A. Nix, 1975: *Modelling of low flow frequency distributions and parameter estimation, presented at the International Water Resources Symposium*, Water for Arid Lands, Tehran, Iran, December 8–9.
- Court, A., 1961: Area-depth rainfall formulas. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 65, No. 6, June, pp. 1823–1831.
- Cunnane, C., 1978: Unbiased plotting positions-A review, *Journal of Hydrology*, 37 (3/4).
- Cunnane, C. 1988: Methods and merits of regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 100: 269–290.
- Cunnane, C. 1989: *Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis*, Operational Hydrology Report No. 33, World Meteorological Organization WMO-No. 718, Geneva, Switzerland.
- Dingman, S. L., 2002: *Physical Hydrology*, Prentice Hall, Inc. New Jersey, USA.
- Draper, N. and Smith, H., 1981: *Applied Regression Analysis*, Second Edition, John Wiley & Sons, Toronto.
- Durrans, S.R. and Tomic, S., 2001: Comparison of Parametric Tail Estimators for Low-Flow Frequency Analysis, *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), pp. 1203–1214.
- England, J.F. Jr., J.D. Salas and R.D. Jarrett, 2003: Comparisons of two moments-based estimators that utilize historical and paleoflood data for the log Pearson type III distribution, *Water Resources Research* 39(9).
- Fennessey, N.M. and R.M. Vogel, 1990: Regional Flow Duration Curves for Ungaged Sites in Massachusetts, *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, 116(4), pp. 530–549.
- Fernandez Mills, G., 1995: Principal component analysis of precipitation and rainfall regionalization in Spain, *Theoretical and Applied Climatology*, 50, 169–183.
- Fill, H., and J. Stedinger, 1995: L-moment and PPCC Goodness-of-Fit tests for the Gumbel Distribution and Effect of Autocorrelation, *Water Resources Research*, 31(1), 225–29.
- Fill, H. and J. Stedinger, 1998: Using regional regression within index flood procedures and an empirical Bayesian estimator, *Journal of Hydrology*, 210(1–4), 128–145.
- Fortin, V., H. Perron, J. Bernier and B. Bobée, 1998: *Determination des crues de conception*, Rapport de recherche R-532, INRS-Eau, 103 pp.
- Francés, F., 1998: Using the TCEV distribution function with systematic and non-systematic data in a regional flood frequency analysis, *Stochastic Hydrology and Hydraulics* 12 (4), 267–283.
- Frederick, R.H., V.A. Meyers and E.P. Auciello, 1977: Five-to-60-minute precipitation frequency for the eastern and central United States, NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-35, National Weather Service, US Dept. of Commerce, Washington, D.C.
- Gabriele, S. and N. Arnell, 1991: A Hierarchical Approach to Regional Flood Frequency Analysis, *Water Resources Research*, 27(6), 1281–1289.
- Gabriele, S. and P. Villani, 2002: The estimation of rainfall frequency in a Mediterranean environment due to extraordinary combinations of hydrological and climatic conditions, The Extremes of the Extremes: Extraordinary Floods (Proceedings of a symposium held at Reykjavik, Iceland, July 2000). IAHS Publ. No. 271, pp. 45–50.
- Gingras, D., M. Alvo and K. Adamowski, 1995: Regional flood relationship by nonparametric regression, *Nordic Hydrology*, 26, pp. 73–90.
- Gray, D.M., ed., 1973: *Handbook on the Principles of Hydrology*, National Research Council of Canada, Water Information Center Inc., Syosset, N.Y.
- Greenwood, J.A., J.M. Landwehr, N.C., Matalas and J.R. Wallis, 1979: Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 5, pp. 1049–1054.
- GREHYS, 1996a: Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 186(1–4): 63–84.
- GREHYS, 1996b: Intercomparison of flood frequency procedures for Canadian rivers. *Journal of Hydrology*, 186(1–4): 85–103.
- F.E. Grubbs and G. Beck (1972). Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations. *Technometrics*, 14(4): 847–854.
- Griffis, V.W., J.R. Stedinger and T.A. Cohn, 2004: LP3 Quantile Estimators with Regional Skew Information and Low Outlier Adjustments, accepted to *Water Resources Research*.
- Grygier, J.C., J.R. Stedinger and H.B. Yin, 1989: A generalized move procedure for extending correlated series, *Water Resources Research*, 25(3), 345–350.
- Guillot, P., 1993: The Arguments of the Gradex Method: a Logical Support to Assess Extreme Floods. *Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts*. Proceedings of the Yokohama Symposium, IAHS Publ. No. 213.
- Guo, S.L., 1991: Nonparametric variable kernel estimation with historical floods and paleoflood information, *Water Resources Research*, 27(1): 91–98.
- Guo, S.L., R.K. Kachroo and R.J. Mngodo, 1996: Nonparametric Kernel Estimation of Low Flow Quantiles, *Journal of Hydrology*, 185, pp. 335–348.
- Gumbel, E.J., 1958: *Statistics of extremes*, Columbia University Press, NY, 375 pp.
- Gustard, A. and K.M. Irving, 1994: Classification of the Low Flow Response of European Soils, FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data, IAHS Publication No. 221, pp. 113–117.
- Hansen, E.M., L.C. Schreiner J.F. and Miller, 1982: Application of probable maximum precipitation estimates: United States east of the 105th meridian. Hydrometeorological Report, No. 52, US National Weather Service.
- Helsel, D.R., and R.M. Hirsch, 1992: *Statistical Methods in Water Resources*, Elsevier, NY.
- Herbst, P. H., K.B. Bredenkamp and H.M.G. Barker, 1966: A technique for the evaluation of drought from rainfall data. *Journal of Hydrology*, Vol. 4, No. 3, pp. 264–272.
- Hershfield, D.M., 1961: Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24-hours and return periods from 2 to 100 years, Technical Paper 40, US Weather Bureau, Washington, D.C.
- Hershfield, D.M., 1965: Method for estimating probable maximum rainfall. *Journal of the American Waterworks Association*, Vol. 57, August, pp. 965–972.

- Hirsch, R.M., 1982: A comparison of four record extension techniques, *Water Resources Research*, 18(4), 1081–1088.
- Hirsch, R. M. and J. R. Stedinger, 1987: Plotting positions for historical floods and their precision, *Water Resources Research*, 23(4), 715–727.
- Hirschboeck, K.K., L.L. Ely and R.A. Maddox, 2000: Hydroclimatology of Meteorologic Floods, Chapter 2, Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities, E.E. Wohl (ed.), Cambridge University Press, Stanford, United Kingdom.
- Hogg, W.D. and D.A. Carr, 1985: *Rainfall frequency atlas for Canada*, Canadian Government Publishing Centre, Ottawa, Canada.
- Hosking, J.R.M., 1990: L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics, *Journal of Royal Statistical Society*, B, 52(2), 105–124.
- Hosking, J.R.M. and J.R. Wallis, 1987: Parameter and quantile estimation for the generalized Pareto distribution, *Technometrics*, 29(3):339–349.
- Hosking, J.R.M. and Wallis, J.R., 1988, The effect of intersite dependence on regional flood frequency analysis. *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 588–600.
- Hosking, J.R.M. and J.R. Wallis, 1995: A comparison of unbiased and plotting-position estimators of L moments, *Water Resources Research*, 31(8), 2019–25.
- Hosking, J.R.M. and J.R. Wallis, 1997: Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-moments, Cambridge University Press.
- Hosking, J.R.M., J.R. Wallis and E.F. Wood, 1985: Estimation of the generalized extreme-value distribution by the method of probability weighted moments, *Technometrics* 27(3), pp. 251–261.
- Huff, F.A. and S.A., Jr. Changnon, 1964: A model 10-inch rainstorm, *Journal of Applied Meteorology*, pp. 587–599.
- Institute of Hydrology, 1980: *Low Flow Studies, Research Report*, Wallingford, Oxon, UK.
- Institute of Hydrology, 1999: *Flood Estimation Handbook*, CEH, Wallingford, UK.
- Interagency Advisory Committee on Water Data, 1982: *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*, Bulletin #17B, US Department of the Interior, US Geological Survey, Office of Water Data Coordination, Reston Virginia.
- Jain, S. and U. Lall, 2001: Floods in a changing climate: Does the past represent the future?, *Water Resources Research* 37(12), 3193–3205.
- Javelle P., 2001: *Caractérisation du régime des crues: le modèle débit-durée-fréquence convergent*. Approche locale et régionale, PhD thesis. Cemagref-Lyon. Institut National Polytechnique de Grenoble. 268 pp. can be downloaded at: <http://www.lyon.cemagref.fr/doc/these/javelle>.
- Javelle, P., T.B.M.J. Ouarda and B. Bobée, 2003: Flood regime definition using the flood-duration-frequency approach: Application to the Provinces of Quebec and Ontario, Canada. *Hydrological Processes*. 17(18): 3717–3736.
- Javelle, P., T.B.M.J. Ouarda, M. Lang, B. Bobée, G. Galea and J.-M. Gresillon, 2002: Development of regional flow-duration-frequency curves based on the index-flood method, *Journal of Hydrology*. 258: 249–259.
- Kite, G.W., 1988: Frequency and Risk Analysis in Hydrology, *Water Resources Publication*, Littleton, CO.
- Kottegoda, M. and R. Rosso, 1997: *Statistics Probability, and Reliability for Civil and Environmental Engineers*, McGraw-Hill, New York.
- Kroll, C.N. and J.R. Stedinger, 1996: Estimation of Moments and Quantiles Using Censored Data, *Water Resources Research*, 32(4), pp. 1005–1012.
- Kuczera, G., 1982: Combining site-specific and regional information: an empirical Bayes Approach. *Water Resources Research*, 18(2):306–314.
- Kundzewicz Z.W., D. Rosbjerg, S.P. Simonowicz and K. Takeuchi, 1993: Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts, IAHS Press, *Institute of Hydrology*, UK, Publication No. 213.
- Landwehr, J.M., N.C. Matalas and J.R. Wallis, 1979: Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles, *Water Resources Research*, 15(5), 1055–1064.
- Lang, M., Ouarda, T.B.M.J. and B. Bobée, 1999: Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of Hydrology*, 225: 103–117.
- Lawal, S.A. and W.E. Watt, 1996: Non-Zero Lower Limit in Low Flow Frequency Analysis?, *Water Resources Bulletin*, 32(6), pp. 1159–1166.
- Lettenmaier, D.P. and K.W. Potter, 1985: Testing flood frequency estimation methods using a regional flood generation model. *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 12, pp. 1903–1914.
- Lettenmaier, D.P., J.R. Wallis and E.F. Wood, 1987: Effect of regional hereogeneity on flood frequency estimation, *Water Resources Research*, 23(2), 313–324.
- Madsen, H., and D. Rosbjerg, 1997, Generalized least squares and empirical Bayes estimation in regional partial duration series index-flood modeling, *Water Resources Research*, 33(4), 771–782.
- Maidment, D. R. (editor in chief), 1993: *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, Inc., New York, USA.
- Mann, H.B. and D.R. Whitney, 1947: On the test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annual Mathematical Statistics*, 18: 50–60.
- Martins, E.S. and J.R. Stedinger, 2000: Generalized Maximum Likelihood Pareto-Poisson Flood Risk Analysis for Partial Duration Series, *Water Resources Research* 37(10), 2559–2567, 2001.
- Martins, E.S. and J.R. Stedinger, 2001: Historical information in a GMLE-GEV Framework with Partial Duration and Annual Maximum Series, *Water Resources Research*, 37(10), 2551–2557.
- Matalas, N.C. and B. Jacobs, 1964: *A correlation procedure for augmenting hydrologic data*, US Geol. Prof. Paper, 434-E, E1-E7.
- Matalas, N., 1963: *Probability Distributions of Low Flows*, Professional Paper 434-A, USGS, Washington D.C.
- Miller, J.F. 1972: *Physiographically Adjusted Precipitation-frequency Maps: Distribution of Precipitation in Mountainous Areas*. WMO-No. 326 (11): 264–277.
- Miller, J.R., R.H. Frederick and R.J. Tracey, 1973: Precipitation frequency atlas of the western United States, NOAA Atlas 2, National Weather Service, NOAA, US Department of Commerce, Silver Spring, MD.

- Moore, R., 1993: *Applications of Weather Radar Data to Hydrology and Water Resources*, WMO, Regional Association VI, (Europe), Working Group on Hydrology, 26 pp.
- Morlat G., 1956: *Les lois de probabilité de Halphen. Revue de statistique appliquée*, 3: 21-43. (http://archive.numdam.org/ARCHIVE/RSA/RSA_1956__4_3/RSA_1956__4_3_21_0/RSA_1956__4_3_21_0.pdf).
- Muirhead, R.J., 1982: *Aspect of Multivariate Statistical Theory*. J. Wiley, 673 pp.
- Muzik, I. and C. Chang, 2003: Regional dimensionless hydrograph for Alberta foothills, *Hydrological Processes*, 17, 3737–3747.
- Nathan, R.J. and T.A. McMahon, 1990: Practical Aspects of Low-Flow Frequency Analysis, *Water Resources Research*, 26(9), pp. 2135–2141.
- Nathan, R.J. and T.A. McMahon, 1992: Estimating Low Flow Characteristics in Ungauged Catchments, *Water Resources Management*, 6, pp. 85–100.
- National Research Council, 1988: *Estimating probabilities of extreme floods*, National Academy Press, Washington, D.C., 141 pp.
- National Research Council of Canada (NRCC), 1989: *Hydrology of floods in Canada: a guide to planning and design*, W.E. Watt editor, Ottawa, 245 pp.
- Natural Environment Research Council, 1975: Flood Studies Report, Volume II: Meteorological Studies, London, England, 81 pp.
- NERC, 1975: Flood Studies Report, Vol. 1, Hydrological Studies, Natural Environment Research Council, 27 Charing Cross Road, London.
- Nguyen, V-T-V., N. In-na and B. Bobee, 1989: A new plotting position formula for Pearson type III distribution, *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 115(6), pp. 709–730.
- Nguyen, V-T-V., T-D. Nguyen and F. Aaskar, 2002: Regional Frequency Analysis of Extreme Rainfalls, *Water Science and Technology*, Vol. 45, No. 2, pp. 75–81.
- Nguyen, V-T-V., J. Rousselle and M.B. McPherson, 1981: Evaluation of areal versus point rainfall with sparse data, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 8(2), pp. 173–178.
- Niemczynowicz, J. 1982: Areal intensity-duration-frequency curves for short term rainfall events, *Nordic Hydrology*, 13(4), pp. 193–204.
- NRC, 1998: Decade-to-Century-Scale Climate Variability and Change: A Science Strategy. National Resources Council, Panel on Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales, Washington, DC: National Academy Press.
- NRCS, 1972: National Engineering Handbook, Section 4, “Hydrology,” Chapter 9.
- Olsen, J.R., J.R. Stedinger, N.C. Matalas and E.Z. Stakhiv, 1999. Climate variability and flood frequency estimation for the Upper Mississippi and Lower Missouri Rivers, *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6), 1509–1524.
- Ouarda, T.B.M.J., G. Boucher, P.F. Rasmussen and B. Bobée, 1997: *Regionalization of floods by canonical analysis*. In “Operational Water Management”, J.C. Refsgaard and E.A. Karalis Eds., A.A. Balkema Pub. Rotterdam, 297–302.
- Ouarda, T.B.M.J., M. Haché and B. Bobée, 1998: *Régionalisation des événements hydrologiques extrêmes*, Research Report No. R-534, INRS-Eau, University of Quebec, Ste-Foy, Canada, 181 pp.
- Ouarda, T.B.M.J., M. Lang, B. Bobée, J. Bernier, P. Bois, 1999: Analysis of regional flood models utilized in France and Quebec, *Review Science Eau*, 12(1): 155–182.
- Ouarda, T.B.M.J., M. Haché, P. Bruneau and B. Bobée, 2000: Regional flood peak and volume estimation in northern Canadian basin. *Journal of Cold Regions Engineer*, ASCE. 14(4): 176–191.
- Ouarda, T.B.M.J., C. Girard, G.S. Cavadias and B. Bobée. 2001: Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology* 254: 157–173.
- Ozga-Zielinska, M.J. Brzezinski and B. Ozga-Zielinski, 1999: *Calculation of Design Flood for Hydraulic Structures*, Institute of Meteorology and Water Resources, No. 27 (in Polish).
- Ozga-Zielinski B., 2002: The Gradex-KC and Gradex-ZN Methods for Estimation of Maximum Floods with T-year Return Period for Cases with Short or Nonexisting Flow Observations. Monographs of Water Management Committee of the Polish Academy of Sciences, No.21 (in Polish).
- Pandey, G. R. and V.T.V. Nguyen. 1999: A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*. 225: 92–101.
- Paulson, R.W., E.B. Chase, R.S. Roberts and D.W. Moddy, 1991: National Water Summary 1988–89 – Hydrologic Events and Floods and Droughts, US Geological Survey Water.
- Pekarova, P., P. Miklanek and J. Peklar, 2003: Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th and 20th centuries, *Journal of Hydrology*, 274, 62–79.
- Perreault L., B. Bobée and P.F. Rasmussen, 1999a: Halphen distribution system, I: Mathematical and statistical properties. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 4(3): 189–199.
- Perreault L., B. Bobée and P.F. Rasmussen, 1999b: Halphen distribution system, II: Parameter and quantile estimation. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 4(3): 200–208.
- Perreault, L., M. Haché, M. Slivitzky and B. Bobée, 1999c: Detection of changes in precipitation and runoff over eastern Canada and US using a Bayesian approach, *Stoch. Env. Resear. And Risk Assess.* 13: 201–216.
- Perreault, L, J. Bernier, B. Bobée and E. Parent, 2000: Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series, Part 1, The normal model revisited, *Journal of Hydrology*. 235: 221–241.
- Piechota, T.C. and J. A. Dracup, 1999: Long-range streamflow forecasting using El Nino-Southern Oscillation indicators, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 4(2), 144–151.
- Pilgrim D.M. and I. Cordery, 1993: Flood Runoff, in Handbook of Hydrology, editor Maidment D. R., McGraw-Hill, Inc., New York, USA.
- Pilgrim, D.H. and D.G. Doran, 1993: Practical Criteria for the Choice of Method for Estimating Extreme Design Floods, IAHS Publication No. 213, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Pilgrim, D. and Cordery, I., 1975: Rainfall temporal patterns for design floods, *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 101 (HY1), pp. 81–95.
- Pilgrim, D.H., ed., 1998: *Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation*, Volumes I and II, Institution of Engineers Australia, Canberra.

- Pilon, P.J. and K.D. Harvey, 1992: The Consolidated Frequency Analysis (CFA) Package. (HOMS component I.81.2.02), Environment Canada, Water Resources Branch, Ottawa.
- Pilon, P.J. and S.Yue, 2002: Detecting climate-related trends in streamflow data, *Water Science and Technology*, 45(8), 89–104.
- Porparto, A. and L. Ridolfi, 1998: Influence of weak trends on exceedance probability, *Stochastic Hydrology and Hydraulics* 12(1), 1–15.
- Reilly, C.F. and C.N. Kroll, 2003: Estimation of 7-day, 10-year low-streamflow statistics using baseflow correlation, *Water Resources Research*, 39(9), 1236.
- Ries, K.G., 1994: Development and application of Generalized least squares regression models to estimate low-flow duration discharges in Massachusetts, US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 94–4155, 33 pp.
- Robson, A. and D. Reed, 1999: Flood Estimation Handbook, Volume 3, Statistical procedures for flood frequency estimation, *Institute of Hydrology*, Wallingford, Oxfordshire, United Kingdom.
- Rossi, F., M. Fiorentino and P. Versace, 1984: Two-Component Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analysis, *Water Resources Research* 20(7), 847–856.
- Salas, J.D., E.E. Wold and R.D. Jarrett, 1994: Determination of flood characteristics using systematic, historical and paleoflood data, in G. Rossi et al., *Coping with Floods*, pp. 111–134, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Schaefer, M.G., 1990: Regional analysis of precipitation annual maxima in Washington State, *Water Resources Research*, 26(1), pp. 119–131.
- Schwarz, G., 1978: Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*, 6: 461–464.
- Searcy, J.K., 1959: *Flow-Duration Curves*, US Geological Survey Water Supply Paper 1542-A.
- Sevruk, B., 1985: Correction of precipitation measurements: summary report, Workshop on the correction of precipitation measurements, April 1–3, 1985, Zurich, Switzerland, pp. 13–23
- Sherwood, J.M., 1994: Estimation of volume-duration-frequency relations of ungauged small urban streams in Ohio. *Water Resources Bulletin* 30(2): 261–269.
- Singh, V. P., 1992: *Elementary Hydrology*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ 07632.
- Smakhtin, V.U., 2001: Low Flow Hydrology: A Review, *Journal of Hydrology*, 240, pp. 147–186.
- Smith, J.A. 1993: *Precipitation*, in *Handbook of Hydrology*, D.R. Maidment, ed., McGraw-Hill, New York, 3.1–3.47.
- Stedinger, J.R. and V.R. Baker, 1987: Surface water hydrology: historical and paleoflood information, US National report to international Union of Geodesy and Geophysics, 1983–1987, *Reviews of Geophysical and Space Physics*, 25(2), 119–124.
- Stedinger J.R., R.M. Vogel and E. Foufoula-Georgiou, 1993: Frequency analysis of extreme events. Chapter 18 (1–66) in: *Handbook of Applied Hydrology*; D.R. Maidment (Ed.) McGraw-Hill, NY.
- Stedinger, J.R. and L. Lu, 1995: Appraisal of Regional and Index Flood Quantile Estimators, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 9(1), 49–75.
- Stedinger, J.R. and T.A. Cohn, 1986, Flood frequency analysis with historical and paleoflood information, *Water Resources Research*, 22(5):785–793.
- Stedinger, J.R. and G.D. Tasker, 1985: Regional Hydrologic Analysis 1. Ordinary, Weighted, and Generalized Least Squares Compared, *Water Resources Research*, 21(9), pp. 1421–1432.
- Stedinger, J.R., 1980: Fitting Log Normal Distributions to Hydrologic Data, *Water Resources Research*, 16(3), 481–490.
- Stedinger, J.R., G. Tasker, 1986: Regional hydrological analysis, 2, model-error estimators, estimation of sigma and log Pearson type 3 distributions. *Water Resources Research*, 22(10):1487–1499.
- Stedinger, J.R. and W.O. Thomas, Jr., 1985: *Low-flow estimation using base-flow measurements*, US Geological Survey Open-File Report 85–95, 22 pp.
- Task Committee of the Hydraulics Division, 1980: Characteristics of Low Flows, *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, 106 (HY5), pp. 717–737.
- Tasker, G.D., 1980: Hydrologic Regression with Weighted Least Squares, *Water Resources Research*, 16(6), pp. 1107–1113.
- Tasker, G.D., 1987: A Comparison of Methods for Estimating Low Flow Characteristics of Streams, *Water Resources Bulletin*, 23(6), pp. 1077–1083.
- Tasker, G.D., 1991: Estimating low-flow characteristics of streams at ungaged sites, US Geological Survey Open-File Report 91–244, Proceedings of the United States – People’s Republic of China Bilateral Symposium on Droughts and Arid-Region Hydrology, September 16–20, 1991, Tucson, Arizona, pp. 215–219.
- Terry, M.E. 1952: Some rank order tests which are most powerful against specific parametric alternatives. *Ann. Math. Statist.*, 23 : 346–366.
- Thomas, W.O., 1985: A uniform technique for flood frequency analysis, *Journal of Water Resources. Planning and Management*, 111(3), 321–337.
- Thomas, D.M. and M.A. Benson, 1970: Generalization of Streamflow Characteristics from Drainage-Basin Characteristics, US Geological Survey Water-Supply Paper 1975, Reston, Virginia.
- Thomas, W.O., Jr. and J.R. Stedinger, 1991: Estimating low-flow characteristics at gaging stations and through the use of base-flow measurements, US Geological Survey Open-File Report 91-244, pp. 197–206.
- US Army Corps of Engineers, 1985: HEC-1 Flood Hydrograph Package, *Hydrologic Engineering Center*, Davis, California.
- Viessman, W. and G.L. Lewis, 2003: *Introduction to Hydrology*, Prentice Hall, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458, USA.
- Vogel, R. and J.R. Stedinger, 1984: Flood plain delineation in ice jam prone regions, *Journal of the Water Resources Planning and Management*, ASCE, 110(WR2), 206–219.
- Vogel, R.M. and N.M. Fennessey, 1994: Flow Duration Curves I: A New Interpretation and Confidence Intervals, *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4), pp. 485–504.
- Vogel, R.M. and N.M. Fennessey, 1995: Flow Duration Curves II: A Review of Applications in Water Resources Planning, *Water Resources Bulletin*, 31(6), pp. 1029–1039.

- Vogel, R.M. and C.N. Kroll, 1989: Low-Flow Frequency Analysis Using Probability-Plot Correlation Coefficients, *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, 115(3), pp. 338–357.
- Vogel, R.M. and C.N. Kroll, 1990: Generalized Low-Flow Frequency Relationships for Ungaged Sites in Massachusetts, *Water Resources Bulletin*, 26(2), pp. 241–253.
- Vogel, R.M. and C.N. Kroll, 1992: Regional Geohydrologic-Geomorphic Relationships for the Estimation of Low-Flow Statistics, *Water Resources Research*, 28(9), pp. 2451–2458.
- Vogel, R.M., and J.R. Stedinger, 1985: Minimum variance streamflow record augmentation procedures, *Water Resources Research*, 21(5), 715–723.
- Vogel, R.M., and N.M. Fennessey, 1993. L-moment diagrams should replace product moment diagrams, *Water Resources Research*, 29(6), 1745–52.
- Wald, A. and J. Wolfowitz, 1943: An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. *Annual Mathematical Statistics*, 14: 378–388.
- Waltemeyer, S.D., 2002: Analysis of the Magnitude and Frequency of the 4-Day Annual Low Flow and Regression equations for Estimating the 4-Day, 3-Year Low-Flow Frequency at Ungaged Sites on Unregulated Streams in New Mexico, US Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 01–4271, Albuquerque, New Mexico.
- Wang, Q.J., 1991: The POT model described by the generalized Pareto distribution with Poisson arrival rate, *Journal of Hydrology*, 129, pp. 263–280.
- Wang, Q.J., 1996: Direct sample estimators of L-moments, *Water Resources Research*, 32(12), 3617–19.
- Waylen, P. and M.-K. Woo, 1982: Prediction of annual floods generated by mixed processes, *Water Resources Research*, 18(4), 1283–86.
- Waylen, P.R. and M.-K. Woo, 1987: Annual Low Flows Generated by Mixed Processes, *Hydrological Sciences Journal*, 32(3), pp. 371–383.
- Weisberg, S., 1980: *Applied Linear Regression*, John Wiley & Sons, Toronto
- Weisner, C.J., 1970: *Hydrometeorology*, Chapman & Hall, London.
- Wenzel, H.G., 1982: Rainfall for urban stormwater design, in: *Urban Storm Water Hydrology*, D.F. Kibler, ed., Water Resources Monograph No. 7, American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Wilks, D.S. 1993: Comparison of the three-parameter probability distributions for representing annual extreme and partial duration precipitation series, *Water Resources Research*, 29(10), pp. 3543–549.
- Wohl, E.E. (ed.), 2000: *Inland flood hazards: human, riparian and aquatic communities*, Cambridge University Press, Stanford, UK.
- World Meteorological Organization, 1969a: *Estimation of Maximum Floods*, WMO No. 233, TP 126, Technical Note No. 98, Geneva, Switzerland.
- , 1969b: *Manual for Depth-area-duration Analysis of Storm Precipitation*, WMO-No. 237, Geneva.
- , 1986a: *Manual for Estimation of Probable Maximum precipitation*, Second Edition, Operational Hydrology Report No. 1, WMO-No. 332, Geneva, 269 pp.
- , 1986b: *Intercomparison of models of snowmelt runoff*, WMO-No.646, Operational Hydrology Rep. No. 23, Geneva.
- , 1981: Selection of Distribution Types for Extremes of Precipitation (B. Sevruk and H. Geiger). *Operational Hydrology Report No. 15*, WMO-No. 560, Geneva.
- , 1999: *Comprehensive Risk Assessment for Natural Hazards*, WMO/TD-No. 955.
- WRC, 1967: Guidelines for Determining flood flow frequency. US Water Resources Council Hydrology Committee, Washington, D.C. Revised versions: Bulletin 15(1975) – 17(1976) – 17 A (1977) – 17B (1981).
- Yue, S., P. Pilon and G. Cavadias, 2002a: Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series, *Journal of Hydrology*, 259, 254–271.
- Yue, S., P. Pilon, B. Phinney and G. Cavadias, 2002b: The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series, *Hydrological Processes*, 16, 1807–1829.
- Yue, S. and P. Pilon, 2004: A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection, *Hydrological Sciences*, 49(1), 21–37.
- Zaidman, M.D., V. Keller, A.R. Young and D. Cadman, 2003: Flow-Duration Frequency Behaviour of British Rivers Based on Annual Minima Data, *Journal of Hydrology*, 277, pp. 195–213.
- Zalina, M.D., Desa, M.N.M., Nguyen, V-T-V., and Amir, K. 2002, Statistical Analysis of Extreme Rainfall Processes in Malaysia, *Water Science and Technology*, Vol. 45, No. 2, pp. 63–68.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Общий термин «моделирование» означает замещение рассматриваемого объекта квазиобъектом или моделью для того, чтобы извлечь информацию об объекте из этой модели. Модель имитирует или воспроизводит отдельные параметры интересующего объекта, которые считаются важными для проводимого исследования. Модель может рассматриваться в качестве рабочего аналога реального объекта, обеспечивающего схожесть, но не идентичность, свойств, важных для конкретной формулировки проблемы. Основным принципом моделирования обусловлен возможностью воспроизводить и прогнозировать поведение сложного объекта или системы с помощью более простой и/или более гибкой модели. Детали реального объекта можно не учитывать, поскольку они не важны в конкретном случае или потому что они слишком сложны, и, следовательно, создают трудности (см. Dooge, 1973).

Были предложены различные способы классификации моделей, начиная с изначального разделения моделей на интуитивные и формализованные. Формализованные модели можно разделить на материальные и символические модели. Класс материальных моделей, представление реальной системы с помощью другой реальной системы, можно разделить на физические модели, также называемые иконическими или похожими моделями, например созданные в соответствующем масштабе гидравлические лабораторные модели дамбы или канала, и аналоговые модели, например, электрические аналоги. Материальные модели обладают свойствами, схожими со свойствами рассматриваемого объекта, но изучение их проще и дешевле. Проводить эксперименты на материальных моделях можно в более комфортных для наблюдения условиях (Singh, 1988), в то время как эксперименты на объекте могут быть затруднены или даже невозможны. Символические модели можно разделить на вербальные, графические и математические. В настоящее время наиболее широко применяются математические модели, главным образом, из-за вычислительных мощностей, которыми обладают доступные компьютеры.

В широком смысле под термином «математическое моделирование гидрологических систем» можно понимать использование математики для описания характерных особенностей гидрологических систем или процессов. Следовательно, любое использование математического уравнения для определения связей между гидрологическими переменными или для представления временной или пространственной структуры одной переменной можно назвать математическим

моделированием. При таком широком определении понятия существует большое количество ссылок на различные главы данного Руководства, поскольку каждый гидрологический процесс можно описать с помощью математических формул. Термин «моделирование гидрологических систем» включает в себя анализ временных рядов и стохастическое моделирование, при котором основное внимание уделяется воспроизведению статистических характеристик временных рядов гидрологической переменной.

Прогресс в моделировании гидрологических систем был тесно связан с появлением и развитием ЭВМ, удобных в использовании операционных систем, прикладного программного обеспечения и методов получения данных. Повсеместное распространение ЭВМ и разработка соответствующих численных методов дали возможность гидрологам выполнять сложные многовариантные вычисления с использованием большого количества данных. Моделирование речного стока стало важным элементом, используемым при планировании и управлении системами водоснабжения и контроля, а также при предоставлении речных прогнозов и выпуске предупреждений. Природа моделирования и вынужденная зависимость от компьютерного программирования делают практически невозможным включение компьютерных разработок в настоящее Руководство. Ссылки приводятся в качестве дополнительного руководящего материала по специфическим аспектам моделирования, но не предпринимается никакой попытки представить готовые к использованию программы для многочисленных моделей, существующих в настоящее время.

6.1 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ [ГОМС J04, J80, K22, K35, K55, L20]

Существует множество способов классификации математических моделей. Например, модель может быть статической или динамической. Соотношение между значениями двух переменных, например между уровнем воды в реке и расходом в поперечном сечении, можно представить одновременно статической или устойчивой моделью и описать алгебраическим уравнением. Примером динамической модели может служить количественное соотношение между мгновенным значением речного стока в рассматриваемом поперечном сечении за данное время и величинами

ранее выпавших осадков над водосбором, замыкаемым этим поперечным сечением: модели осадки–сток. В динамических моделях обычно используются обыкновенные дифференциальные уравнения или дифференциальные уравнения в частных производных. Существуют многочисленные разветвленные классификации динамических моделей. Обсуждение этого вопроса можно найти в работе Сингх (Singh, 1988).

Категория динамических гидрологических моделей очень широка и охватывает полный спектр подходов. Крайними из них являются, с одной стороны, полностью эмпирические подходы типа «черного ящика», не предназначенные для моделирования процессов, происходящих внутри бассейна и определяющих его реакцию, а устанавливающие соответствие потока на входе в бассейновую систему и выходе из нее. Особой категорией моделей типа «черный ящик» являются искусственные нейронные сети. С другой стороны — подходы, предусматривающие решение сложных систем уравнений, базирующихся на физических закономерностях и теоретических концепциях, определяющих гидрологические процессы — так называемые «гидродинамические модели» (см. *Hydrological Model for Water-Resources System Design and Operation* (Гидрологическая модель для проектирования и эксплуатации водных систем), *Operational Hydrology Report No. 34*). Между этими двумя крайними подходами находятся различные концептуальные модели. Эти модели представляют собой структуру на основе простых концептуальных элементов, например линейных и нелинейных резервуаров и потоков, которые приблизительно воспроизводят процессы, происходящие в бассейне. Эти модели, независимо от того, являются ли они моделями типа «черного ящика», концептуальными или гидродинамическими, дают на выходе результаты без указания соответствующих вероятностей наступления тех или иных событий. По этой причине их часто относят к детерминистским моделям.

Модели с сосредоточенными параметрами имеют постоянные параметры, которые не меняются в пространстве и, как правило, описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, в то время как параметры моделей с распределенными параметрами, физическая сущность которых описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, могут изменяться в пространстве. Модели с распределенными и полураспределенными параметрами объединены, поскольку они используют данные о полях распределения величин, получаемые с помощью дистанционного зондирования. Линейные модели удобны в использовании, потому что их решения могут быть получены в аналитической форме, и они подчиняются, в отличие от нелинейных моделей, принципу суперпозиции. Модели могут быть стационарными,

другими словами — неизменяющимися во времени, если соотношение входа–выхода и параметров модели не изменяется во времени. И наоборот — нестационарными моделями, изменяющимися во времени. Модели могут быть непрерывными и, следовательно, описываться при помощи дифференциальных уравнений и интегралов, или дискретными и описываться при помощи уравнений в конечных разностях и суммах.

Полезность применения при определенных обстоятельствах чисто эмпирических соотношений и соотношений типа «черного ящика» уже была подтверждена и впредь будет подтверждаться в определенных обстоятельствах, хотя они могут быть подвержены серьезной ошибке, когда возникает необходимость их применения в неизвестных прежде условиях. Модели, которые на основе теоретических концепций обрабатывают изменяющиеся и взаимодействующие гидрологические процессы, т. е. физически обоснованные модели, представляются более надежными в таких условиях, и проведение экспериментов с ними имеет широкие научные перспективы. Любая попытка классифицировать детерминированные модели в качестве гидродинамических, концептуальных или «черного ящика» требует решения вопроса относительно степени эмпиризма каждой из них. Классификация динамических гидрологических моделей является, до некоторой степени, субъективной, поскольку эмпирический опыт одного исследователя может быть для другого лишь теорией (Singh, 1988). Однако считается необходимым следовать такой классификации при рассмотрении детерминистских моделей.

6.1.1 Модели типа «черного ящика»

Речной бассейн может рассматриваться как динамическая система с сосредоточенными (т. е. неизменными в пределах бассейна) параметрами, которые преобразуют входные факторы — жидкие осадки и снеготаяние — в гидрограф стока с бассейна. Такой же подход принимается и для участка реки, кроме случаев, когда приток в точке или точках выше по течению реки должен трактоваться как дополнительный входной фактор. Схематически такие системы могут быть представлены в виде, показанном на рисунке II.6.1, где $P(t)$ — вход, а $Q(t)$ — выход, являющиеся функциями от времени t . С точки зрения теории динамических систем гидрологические системы ведут себя как линейные, если они соответствуют принципу суперпозиции, а именно когда реакция системы на объединенное воздействие входных факторов адекватна совокупной реакции на воздействие каждого из них в отдельности, а параметры системы не зависят от ее входных или выходных параметров. Допущение, что гидрограф стока с водосбора можно предсказать только по данным об осадках и снеготаянии, лишь включает предположение о том, что изменчивость других естественных

входных параметров, таких как суммарное испарение, невелика или ничтожна, или описывается известной функцией времени.

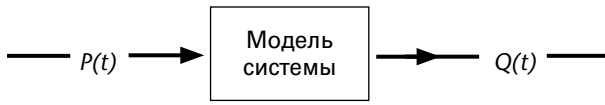


Рисунок II.6.1. Система «черного ящика»

Общее выражение для соотношения между входом $P(t)$ и выходом $Q(t)$ линейной динамической системы с сосредоточенными параметрами может быть записано в виде:

$$a_n(t) \frac{d^n Q}{dt^n} + a_{n-1}(t) \frac{d^{n-1} Q}{dt^{n-1}} + \dots + a_1(t) \frac{dQ}{dt} + a_0(t) Q = b_n(t) \frac{d^n P}{dt^n} + b_{n-1}(t) \frac{d^{n-1} P}{dt^{n-1}} + \dots + b_1(t) \frac{dP}{dt} + b_0(t) P \quad (6.1)$$

где коэффициенты a_i и b_i являются параметрами, характеризующими свойства системы. Решение уравнения (6.1) при нулевых начальных условиях приводит к следующему выражению:

$$Q(t) = \int_0^t h(t, \tau) P(\tau) d\tau \quad (6.2)$$

где функция $h(t, \tau)$ представляет реакцию системы за время t на единичный входной импульс за время τ . Существуют многочисленные приближения для представления гидрологических систем в виде уравнений, включающих функцию влияния $h(t, \tau)$, иногда называемую откликом на импульс. Она может быть выражена через коэффициенты a_i и b_i уравнения (6.1). Если эти коэффициенты постоянны во времени, то система инвариантна во времени и уравнение (6.2) превращается в интеграл Дюамеля:

$$Q(t) = \int_0^t h(t - \tau) P(\tau) d\tau \quad (6.3)$$

Можно показать, что концепция единичного гидрографа и методы расчета трансформации стока, рассматриваемые в разделах 6.3.2.2.5 и 6.3.4.3, являются всецело примерами линейных динамических систем, отвечающих принципу суперпозиции.

Нелинейные системы — системы, для которых принцип суперпозиции не выполняется. В общем виде отклик нелинейной системы с сосредоточенными параметрами на входной импульс может выражаться либо обыкновенным нелинейным дифференциальным уравнением, либо следующим интегральным уравнением:

$$Q(t) = \int_0^t h(\tau) P(t - \tau) d\tau + \int_0^t h(\tau_1, \tau_2) P(t - \tau_1) P(t - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \int_0^t \dots \int_0^t h(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) P(t - \tau_1) P(t - \tau_2) \dots P(t - \tau_n) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_n \quad (6.4)$$

где $h(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$ — функция, выражающая постоянные во времени характеристики физической системы. Она аналогична функции влияния в уравнении (6.2). Первый член правой части уравнения (6.4) описывает линейные свойства системы, второй — определяет квадратические свойства, третий — кубические и т. д.

6.1.2 Искусственные нейронные сети

Особый класс математических моделей представляют искусственные нейронные сети, которые все чаще используются в качестве альтернативного способа решения широкого диапазона гидрологических задач. Этот подход можно рассматривать как инструмент моделирования состоящих из нескольких взаимосвязанных единиц обработки сигнала, которые носят название искусственных нейронов. Искусственные нейронные сети, которые могут фиксировать и представлять сложные соотношения параметров входа-выхода, напоминают соответствующую структуру человеческого мозга, но порядки величины не настолько велики. Идеей, которая стояла за разработкой искусственных нейронных систем, было желание смоделировать основные функции настоящего мозга и создать искусственную систему, которая могла бы выполнять интеллектуальные задания, подобные тем, которые выполняет мозг. Искусственные нейронные сети приобретают знания в процессе изучения и хранят их в межнейронных связях или синаптических весах.

Искусственные нейронные сети представляют собой простое кластерное объединение примитивных искусственных нейронов. Каждый нейрон связан с рядом своих соседей. Такой кластер образован связанными друг с другом слоями нейронов. Эти связи определяют возможность влияния одного слоя на другой. Некоторые нейроны во входных и выходных слоях соприкасаются с реальными условиями: нейроны во входном слое получают входные данные из внешней среды, а нейроны выходного слоя связывают искусственную сеть с внешней средой (рисунок II.6.2). Обычно между входными и выходными слоями существуют другие многочисленные скрытые слои.

Когда входной слой получает входные данные, его нейроны создают выходные значения, которые становятся

входными для следующего уровня системы. Процесс продолжается пока выходной слой не передаст выходные данные внешней среде. Функция входа–выхода, или функция передачи, должна быть точно определена для отдельных элементов искусственных нейронных сетей. Например, функция передачи может подчиняться линейному или сигмоидальному закону, или иметь пороговое значение. Для создания нейронной сети для решения определенной задачи необходимо выбирать структуру сети и схему взаимосвязи между ее элементами и устанавливать удельные значения связей, определяющих силу взаимодействия.

Обучаемость нейронной сети определяется ее архитектурой и выбранным обучающим алгоритмом. Существует большое количество законов обучения, которые используются в данных сетях. Эти законы представляют собой математические алгоритмы обновления взвешенных соединений. Изменение взвешенных соединений искусственной нейронной сети, известное как обучение, побуждает сеть изучать решение проблемы. Сбор новых знаний завершается корректировкой взвешенных соединений таким образом, чтобы полученная сеть давала правильные результаты. Разработчик искусственной нейронной цепи должен принять решение о расстановке нейронов в различных слоях, о связях внутри и между слоями, о способе получения нейроном входных данных и выдаче выходных и о принципе процесса обучения. Определение числа скрытых нейронов в сети можно рассматривать как задачу оптимизации, которая обычно решается методом проб и ошибок. Чрезмерное увеличение числа скрытых нейронов приводит к переобучению, и в этом случае обобщение будет затруднено.

Для исследования моделей был разработан целый ряд различных типов архитектуры искусственных нейронных сетей и учебных алгоритмов, начиная с упреждающих нервный сигнал сетей, обученных с помощью

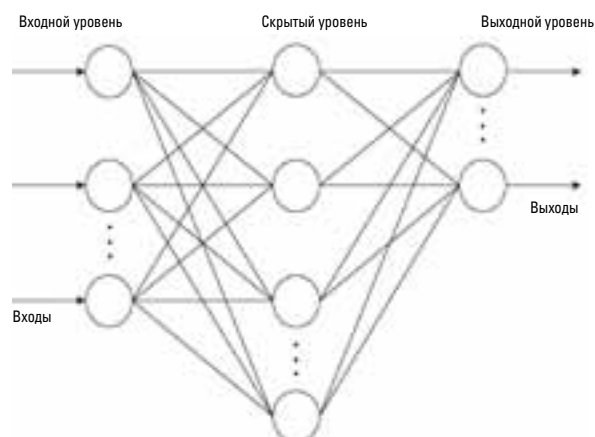


Рисунок II.6.2. Структура искусственной нейронной сети

алгоритма обратного распространения, и до самоорганизующихся карт. Искусственные нейронные сети — это быстрый и гибкий подход, который был признан удовлетворяющим гидрологическое моделирование в широком диапазоне обстоятельств. Нейронные сети применяются в некоторых областях гидрологии, например при моделировании связи «осадки–сток» (см. Minns and Hall, 1996), трансформации стока (Cigizoglu, 2003) и переноса наносов (Tayfur, 2002). Поскольку нейронные сети лучше всего выявляют структуру и тренды данных, они хорошо подходят для прогнозирования.

Принципиальное преимущество нейронных сетей лежит в их способности представлять как линейные, так и нелинейные отношения и изучать эти отношения непосредственно с помощью моделируемых данных. Традиционные линейные модели просто не подходят, когда необходимо моделировать данные, содержащие нелинейные характеристики, а именно такие данные чаще всего встречаются в гидрологических системах. В начале XXI века выполняется большое количество исследований нейронных сетей и их применения для решения разнообразных проблем по всему миру. Однако в гидрологической практике эти методы пока не используются на постоянной основе. Традиционные технологии все еще более предпочтительны, чем новинки, чьи достоинства еще не подтверждены. Также схожесть искусственных нейронных сетей с «черными ящиками» вызывает отторжение у части гидрологов.

6.1.3 Концептуальные модели

В подходах, обсуждавшихся в предыдущем разделе, используются только самые общие идеи о преобразовании входных данных в гидрограф стока, в то время как имеется достаточно большой объем информации о системе или процессе. Данный тип анализа обычно не дает хороших результатов при решении проблем моделирования водосборов, когда необходимо оценить влияние на них изменчивости и изменений климата, землепользования и других видов хозяйственной деятельности. В результате получил развитие подход к моделированию, включающий решение систем уравнений, в основу которых положены различные концепции описания физических процессов формирования стока. Обычно такие модели называют концептуальными.

Одним из наиболее трудных аспектов применения концептуальных моделей является калибровка выбранной модели применительно к конкретному водосбору. Большинство параметров модели определяются итерационным способом, вручную или автоматически, на основе исторических рядов входных и выходных данных. Из-за ограниченности данных, несовершенства модели и наличия внутренних связей между

параметрами даже небольшое увеличение их количества способно значительно повысить трудности, связанные с калибровкой модели. Поэтому необходимо, чтобы число параметров соответствовало степени достоверности исходных данных и требуемой точности. Другими словами, современные концепции, основанные на теоретических достижениях, обычно требуют упрощения для удобства использования.

Большое число концептуальных моделей описано в литературе (*Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting* (Взаимное сравнение концептуальных моделей, используемых в оперативном гидрологическом прогнозировании (WMO-No. 429))). В данном случае признано уместным ограничить рассмотрение этих моделей кратким описанием трех из них, наиболее подходящих для рассмотрения в настоящем Руководстве. Несколько концептуальных моделей включены в Гидрологическую оперативную многоцелевую систему (ГОМС) ВМО.

6.1.3.1 Модель Сакраменто

Модель Сакраменто была разработана в Центре речных прогнозов Национальной службы погоды США в Сакраменто, штат Калифорния. Эта модель включает сложный алгоритм расчета влажности почвы, предназначенный для получения значений объемов нескольких компонентов речного стока, в то время как достаточно простой и почти полностью эмпирический подход используется для преобразований этих входных данных в гидрограф стока. Почвенная толща разделена на две части — верхнюю зону и нижнюю зону, каждая из которых имеет емкости для капиллярной и свободной воды. Капиллярная вода тесно связана с почвенными частицами и извлекается из почвы только в процессе испарения. Гравитационная вода, согласно принятому условию, стекает в процессе дренирования вертикально вниз и в горизонтальном направлении. Размеры емкостей для капиллярной и гравитационной воды в каждой зоне рассматриваются в качестве модельных параметров. Вода, поступившая в зону, суммируется с запасом капиллярной влаги до тех пор, пока не превысит капиллярную влагоемкость; излишек воды в этом случае идет на пополнение запаса свободной воды.

Одна часть осадков любого вида немедленно поступает в русловую систему в виде прямого стока. Это те осадки, которые выпадают в пределах русловой системы, а также на прилегающих водонепроницаемых площадях. Размеры этих площадей в модели изменяются во времени. Как дождевые осадки, так и осадки, образовавшиеся в результате снеготаяния, кроме тех, которые перешли непосредственно в прямой сток, проникают в верхнюю зону. Гравитационная вода в верхней зоне расходуется либо на внутрпочвенный

сток, либо на фильтрацию в нижнюю зону. Если пополнение влаги в верхней зоне происходит быстрее ее истощения, излишек воды расходуется на поверхностный сток. Свободная вода в нижней зоне перераспределяется между первичной (медленный дренаж) и вторичной ёмкостями. Рисунок II.6.3 иллюстрирует основные особенности этой модели.

Фильтрация из верхней зоны в нижнюю определяется по уравнению:

$$PRATE = PBASE \left[1 + ZPERC * RDC^{REXP} \right] \frac{UZFWC}{UZFWM}, \quad (6.5)$$

где *PRATE* — скорость фильтрации; *PBASE* — скорость, с которой будет происходить фильтрация в случае насыщения нижней зоны и при неограниченном запасе влаги в верхней зоне. Численно она равна максимальной скорости оттока из нижней зоны и рассчитывается как сумма запасов свободной воды в первичной и вторичной емкостях, каждый из которых умножается на свой коэффициент оттока. *RDC* — отношение дефицита влаги нижней зоны к влагоемкости. То есть *RDC* = 0, когда нижняя зона полностью насыщена, и *RDC* = 1, когда она полностью сухая. *ZPERC* — параметр модели, который определяет диапазон изменений скорости фильтрации. При неограниченной подаче свободной воды в верхнюю зону скорость фильтрации будет изменяться от *PBASE* (нижняя зона насыщена) до *PBASE(1 + ZPERC)*, когда нижняя зона опорожнена. *REXP* — параметр модели, определяющий форму кривой зависимости между максимальным и минимальным значениями скорости фильтрации, указанными выше. *UZFWC* — содержание свободной влаги в верхней зоне. *UZFWM* — влагоемкость верхней зоны. Отношение *UZFWC/UZFWM*, является движущей силой влагообмена в верхней зоне. Когда верхняя зона опорожнена, фильтрации не происходит. При заполненной верхней зоне скорость фильтрации будет регулироваться дефицитом влаги в нижней зоне.

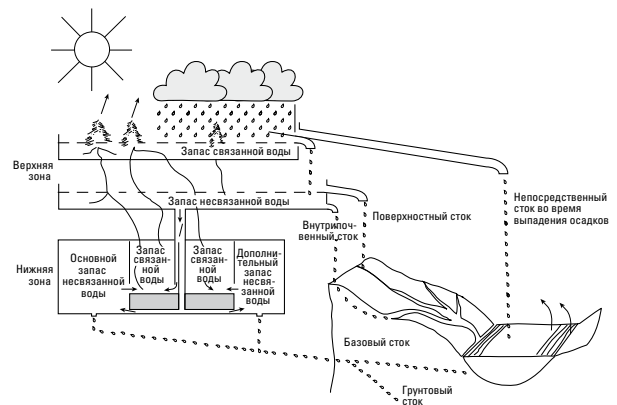


Рисунок II.6.3. Структура модели Сакраменто

Вышеуказанное уравнение является стержнем всей модели. Оно взаимодействует с другими компонентами модели таким образом, что управляет движением воды во всех частях почвенного профиля как выше, так и ниже границы раздела фильтрационного потока и, в свою очередь, контролируется в процессе передвижения воды во всех частях почвенного профиля. Скорость суммарного испарения оценивается при помощи метеорологических переменных и по данным водных испарителей. Для этого могут использоваться или ежедневные, или полученные за длительный период средние значения. Суммарный расход влаги на испарение определяется величиной испаряемости, умноженной на коэффициент, который является функцией календарной даты, отражающей состояние растительного покрова. Влага, рассчитанная в процессе моделирования, расходуется прямо или косвенно на суммарное испарение либо из различных аккумулирующих ёмкостей, либо из русловой сети. Потери на испарение распределяются в соответствии с иерархией приоритетов и ограничиваются наличием влаги так же, как и принятыми требованиями к расчетам.

Продвижение влаги через почвенную толщу является непрерывным процессом. Скорость стекания в любой точке варьируется в зависимости от скорости притока влаги и запаса влаги в соответствующем ёмкостном элементе. Этот процесс воспроизводится на основании расчета квазилинейных уравнений. Расчет дренирования и фильтрации воды на каждом временном шаге основан на неявном допущении того, что перемещение влаги в течение конкретного временного шага определяется условиями, сложившимися к началу этого шага. Это допущение приемлемо только в том случае, если временной шаг выбран достаточно коротким. Длительность шага в модели зависит от объема воды. То есть длина шага выбирается таким образом, чтобы не более 5 мм влаги участвовало в каждом отдельном вычислительном цикле.

Пять составляющих речного стока рассчитываются в модели. Три компонента стока верхней зоны (склоновый, поверхностный и внутрпочвенный) суммируются и преобразуются в единичный гидрограф (см. раздел 6.3.2.2.5). Два компонента нижней зоны — первичный и вторичный базисный сток — непосредственно добавляются к гидрографу оттока, полученному по трем другим составляющим. Предусмотрен также расчет результирующего гидрографа стока с переменными расчетными коэффициентами.

Модель «Сакраменто» является компонентом ГОМС и имеет идентификационный код J04.3.01.

6.1.3.2

Резервуарная модель

Эта модель разработана в Национальном исследовательском центре по предотвращению стихийных бедствий в Токио, Япония (Sugawara and others, 1974). Как следует из названия модели, почвенная толща представляется в виде системы резервуаров, расположенных один над другим, как изображено на рисунке II.6.4 (а). Предполагается, что все дождевые осадки и талые воды поступают в самый верхний резервуар. Каждый резервуар имеет одно выпускное отверстие в дне и одно или два боковых отверстия, расположенных на некотором расстоянии от дна. Вода, вытекающая через донное отверстие любого из резервуаров, поступает в следующий ниже лежащий резервуар; исключение составляет самый нижний резервуар, т. к. поступившая в него вода является потерей для системы. Вода, вытекающая из любого резервуара через боковое отверстие (боковой сток), рассматривается как входной импульс по отношению к русловой системе. Количество и размер резервуаров, а также расположение выходных отверстий являются параметрами модели.

Описанная конфигурация резервуаров применяется для моделирования процесса «осадки–сток» во влажных районах; для бассейнов, расположенных в аридных и полуаридных районах, требуется более сложное расположение резервуаров, как показано на рисунке II.6.4 (б). Если для каких-либо водосборов характерны продолжительные засушливые периоды, то в модель включаются два или более параллельно расположенных рядов резервуаров. Сток из самого нижнего резервуара каждого ряда соответствует стоку из отдельного резервуара в простой резервуарной модели. Из каждого резервуара определенная доля воды поступает

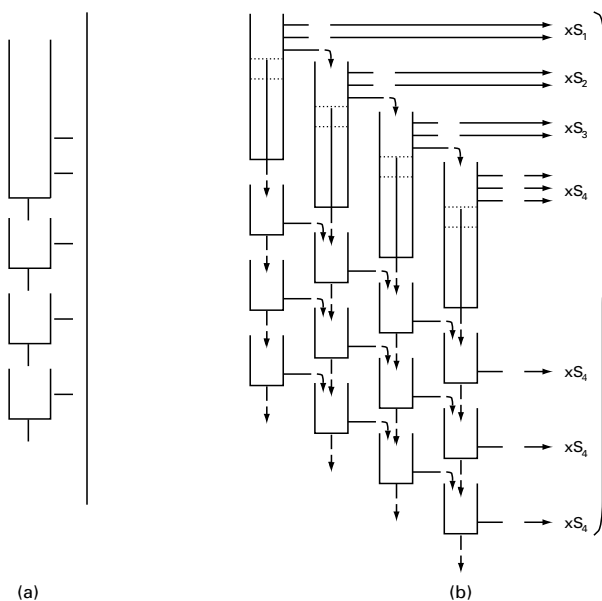


Рисунок II.6.4. Резервуарная модель

в виде бокового стока в соответствующий резервуар соседнего ряда, а из последнего ряда резервуаров боковой сток поступает непосредственно в русловую сеть. Из самых верхних резервуаров каждого ряда дополнительно предусмотрен боковой сток непосредственно в русловую сеть. Предполагается, что каждый ряд резервуаров представляет определенную зону водосбора, причем самый нижний соответствует зоне, ближайшей к русловой сети. По мере изменения гидрологических условий от влажных к засушливым в зависимости от сезона, зона, ближайшая к русловой сети, может оставаться относительно влажной, в то время как более удаленная зона становится достаточно сухой. Разработчики модели не считают, что представленное описание ёмкостных элементов модели является совершенно реалистичным, скорее принятое расположение резервуаров является приближением к методу конечных разностей. Более того, математические выражения, описывающие движение воды через резервуары, имеют сходство с классическими концепциями гидрологии.

В модели различаются два типа воды — связанная вода, а именно почвенная влага, и свободная вода, которая может перемещаться как вертикально вниз, так и в горизонтальном направлении. Предусмотрено также, что свободная вода пополняет влагозапас почвы за счет действия капиллярных сил. Модель рассчитывает потери на суммарное испарение с бассейна на основе данных о величинах измеренного или вычисленного суточного испарения, влагозапасах с учетом иерархии приоритетов различных ёмкостных элементов.

Основная расчетная схема в пределах каждого резервуара включает функцию сброса, определяемую как:

$$\frac{dx}{dt} = \alpha x, \quad (6.6)$$

где x — объем резервуара; t — время. Отток воды за единицу времени Δt тогда будет равен $[1 - e^{-\alpha \Delta t}]x$. Величина $[1 - e^{-\alpha \Delta t}]$ рассчитывается для каждого выпускного отверстия в зависимости от величины α и заданного временного интервала.

Для каждого интервала времени в модели предусмотрен следующий порядок вычислений:

- a) для верхнего резервуара:
 - i) исключение суммарного испарения;
 - ii) перевод свободной воды в почвенную влагу;
 - iii) добавление дождевых осадков или талых вод;
 - iv) расчет притока в русловую сеть (боковой сток) и просачивания (сток вниз) и исключение этих величин из объемов свободной воды;
- b) для нижерасположенного резервуара:
 - i) исключение суммарного испарения в зависимости от иерархии приоритетов;

- ii) перевод свободной воды в почвенную влагу;
- iii) добавление воды, просочившейся из верхнего резервуара;
- iv) расчет притока в русловую сеть (боковой сток) и просачивания (сток вниз) и исключение этих величин из объемов свободной воды.

Приток в русловую сеть — это выходной результат по блоку расчета влажности в модели. Гидрограф стока строится по данным о притоке воды в русловую сеть в предположении, что:

$$Q = KS^2, \quad (6.7)$$

где Q — сток; S — запас воды в русловой сети; K — дополнительный параметр модели. Ограничение накладывается на соотношение dQ/dS , чтобы сток в реке не мог превысить запас воды в русле. Одной из интересных особенностей модели является то, что изменение значений параметров модели может приводить к существенному изменению структуры модели.

Резервуарная модель является компонентом ГОМС и имеет идентификационный код J04.1.01.

6.1.3.3 Модель HBV

Модель HBV, разработанная Бергстрёмом (Bergström, 1992, 1995) в Шведском метеорологическом и гидрологическом институте, представляет собой концептуальную модель водосбора, которая преобразует осадки, температуру воздуха и потенциальное суммарное испарение либо в снеготаяние, либо в сток или приток в водохранилище. Модель была неоднократно модифицирована, и ее различные версии существуют во многих странах.

Модель описывает общий баланс воды следующим образом:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt} [SP + SM + UZ + LZ + VL], \quad (6.8)$$

где P — осадки, E — суммарное испарение, Q — сток, SP — снежный покров, SM — влажность почвы, UZ — верхняя зона подземных вод, LZ — нижняя зона подземных вод и VL — объем озер.

Модель HBV можно рассматривать как модель с полураспределенными параметрами; водосбор разбивается на частные водосборы, также применяется метод высотного районирования. Эта модель включает в себя подпрограммы для метеорологической интерполяции, расчета накопления снега и снеготаяния, суммарного испарения, влажности почвы, обобщения стока и, наконец, для расчета трансформации движения воды по рекам и через озера. Для водосборов

определенного высотного положения осуществляется дополнительное деление на высотные зоны. Каждую высотную зону можно подразделить на подзоны по типу растительности, например лесные и не лесные территории.

Стандартный режим снеготаяния в модели HBV — это концепция «градусо-дней», основанная на температуре воздуха. Таяние происходит в соответствии с высотным зонированием и вертикальным градиентом температуры и моделируется по-разному для лесных и открытых площадей. Предполагается, что снежный покров сохраняет талую воду до тех пор, пока не будет исчерпана водоудерживающая способность снега. Если температура опускается ниже порогового значения, то эта вода постепенно вновь замерзает.

Учет влажности почвы в модели HBV основан на изменении метода резервуаров в предположении о статистическом распределении накопительных способностей бассейна. Это является основой контролирования информации о стоке. Потенциальная эвапотранспирация с ростом дефицита влажности почвы в модели сводится к фактическим значениям испаряемости и происходит только с поверхности озер в безледоставный период. Условия ледоставного периода моделируются простым заданием в подпрограмме температуры воздуха, что на выходе дает значения разницы температуры воздуха и поверхности озера.

Последовательность формирования стока представляет собой функцию реагирования, преобразующую избыточную почвенную влагу в сток. Она также учитывает осадки, выпадающие непосредственно на поверхность озер, рек и других увлажненных территорий и испарение с них. Функция состоит из одного верхнего, нелинейного, и одного нижнего, линейного, резервуаров, дающих быстрый и медленный базисный сток гидрографа. Озера также можно моделировать явно, так, чтобы изменение уровня воды наблюдалось в озерах, находящихся на выходе из подбассейна. Разделение на подмодели, обусловленное выходными данными главных озер, следовательно, очень важно для определения динамики моделируемого стока. Трансформацию стока по длине водотока между подбассейнами можно описать методом Маскингама (см., например, Shaw, 1994) или просто временем добегания.

Полная переоценка модели осуществлялась в 1990-е годы и привела к появлению версии модели под названием HBV-96 (Lindström and others, 1997). В ее задачи входило улучшить согласование пространственно распределенных данных модели, сделать ее более правдоподобной в физическом плане и повысить эффективность модели. Пересмотр модели привел к изменениям в описании процессов, автоматической калибровке и оптимальной интерполяции осадков и

температуры геостатистическим методом. Все вместе эти изменения улучшили рабочие характеристики модели. Для последующей интеграции пространственных полей данных в модели необходимо применение более высокого пространственного разрешения. Улучшения в модели были в большей степени проведены за счет изменений в обработке входных данных и новых методов калибровки, а не за счет изменений процесса описания модели.

Необходимой входной информацией для модели являются количество осадков (суточные суммы), температура воздуха (среднесуточные значения) и оценки возможного суммарного испарения. Стандартная модель действует на основе месячных данных об усредненном по большому промежутку времени потенциальном суммарном испарении, обычно основанном на формуле Пенмана, скорректированной для температурных аномалий (Lindström and Bergström, 1992). В качестве альтернативы, суточные значения можно рассчитать как пропорциональные температуре воздуха, но с коэффициентами пропорциональности ежемесячных значений. Более поздние версии модели HBV могут работать с данными более высокого временного разрешения, т. е. ежечасными данными.

Хотя автоматическая калибровка сама по себе не является частью модели, она имеет важное практическое значение. Метод автоматической калибровки для модели HBV, разработанный Лингстрёмом (Lindström, 1997), позволяет использовать различные критерии для различных параметров или комбинированные критерии. Этот процесс требует одновременных данных наблюдений за стоком и метеорологическими условиями. Если нет данных о стоке, в некоторых случаях параметры можно оценить по известным характеристикам водосбора.

Модель HBV широко применяется во многих сферах, в т. ч. при проектировании водосливов (Bergström and others, 1992; Lindström and Harlin, 1992), оценке водных ресурсов, оценке запасов питательных веществ (WMO, 2003) и изучении изменений климата (Bergström and others, 2001). Недавно эту модель стали использовать для составления гидрологических карт в национальном масштабе, например в Норвегии (Beldring and others, 2003) и Швеции (SNA, 1995). Модель HBV является компонентом ГОМС с идентификационным номером J04.2.02. Для получения дополнительной информации см.: <http://www.smhi.se/sgn0106/if/hydrologi/hbv.htm>.

6.1.4 Модели с распределенными параметрами

Математическое моделирование в гидрологии обычно было представлено моделями с сосредоточенными

параметрами, постоянными для всего водосбора. Однако недавно были разработаны некоторые модели с полураспределенными и распределенными параметрами. Они предназначены для более надежного описания природных гидрологических процессов и поэтому могут включать некоторые метеорологические переменные и параметры водосбора. Эти модели позволяют получать ряды данных о поверхностном стоке, характеристиках качества воды и расходах грунтовых вод. Основными входными данными в таких моделях являются ряды по дождевым осадкам, но могут использоваться данные о снеготаянии, температуре, радиации, потенциальном суммарном испарении и т. д. Модели для урбанизированных водосборов могут включать описание дренажной сети. Модели для водосборов, подверженных сельскохозяйственному использованию, могут включать единичные гидрографы, распределения площадей по времени добегаания или кривые трансформации стока.

Однако потенциал распределенных, физически обоснованных моделей до сих пор используется лишь частично (Refsgaard and Abbott, 1996). Это объясняется несколькими причинами. Модели с распределенными параметрами требуют большого количества данных, которые не всегда существуют или недоступны. Оперативное дистанционное зондирование по-прежнему не является всеобщей практикой, за исключением исследования снежного покрова и землепользования/растительности.

Большое количество параметров распределенной физической модели нельзя измерить в полевых условиях, и калибровка такой модели является сложной задачей оптимизации. Кроме того, в распределенных моделях редко используются более сложные и обоснованные описания, потому что они потребовали бы больше параметров, которые необходимо определять. Это упрощение может негативно повлиять на точность физической основы.

Как отметил Бевен (Beven, 1996), физически обоснованные модели с распределенными параметрами используют мелкомасштабные уравнения в предположении, что изменение масштаба может быть обеспечено использованием эффективных значений параметров. Однако физически обоснованные уравнения мелкого масштаба не увеличивают с легкостью масштаб в неоднородной системе. Бевен (Beven, 1996) видел возможное решение в подходе, который распознает ограничения процесса моделирования, например структуру неопределенности. Параметры, зависящие от масштаба, могли бы быть основаны на статистической модели неоднородности. В общем случае действенная параметризация совокупности не является тривиальной задачей.

Модели с распределенными параметрами обеспечивают основу для полного использования разнообразной информации, имеющей отношение к физическим процессам, происходящим на водосборе. Европейская гидрологическая система (DHI, 1985) является примером гидродинамически обоснованной модели с распределенными параметрами и представлена на рисунке II.6.5. Европейская гидрологическая система — это модель с распределенными параметрами, которая представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих физические процессы в бассейне: задержание осадков растительностью, суммарное испарение, склоновый и русловой сток, движение воды в зонах аэрации и насыщения и снеготаяние.

Блок, описывающий процесс задержания осадков растительностью, представлен в виде варианта модели Руттера, которая позволяет определять интенсивность изменения количества влаги, задержанной поверхностью растительного покрова:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = Q - K e^b (C - S), \tag{6.9}$$

$$\text{где: } Q = \begin{cases} P_1 P_2 (P - E_p C / S) & \text{при } C < S \\ P_1 P_2 (P - E_p) & \text{при } C \geq S \end{cases}$$

C — слой воды, задержанной поверхностью растительного покрова; S — водоудерживающая способность растительного покрова; P — интенсивность выпадения жидких осадков; P_1 — доля площади, покрытой растительностью; P_2 — отношение общей площади листовой поверхности к площади, покрытой растительностью; E_p — интенсивность потенциального испарения; K и b — фильтрационные параметры; t — время.

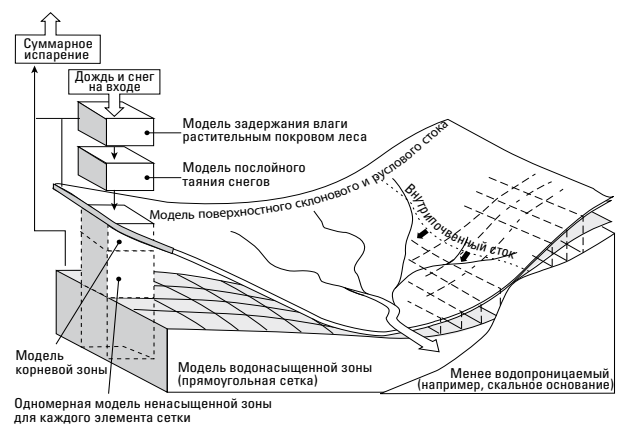


Рисунок II.6.5. Структура Европейской гидрологической системы

Для расчета интенсивности действительного суммарного испарения используется уравнение Пенмана-Монтейта:

$$E_a = \frac{\Delta R_n \frac{\varphi C_p v_e}{r_a}}{\lambda \left[\Delta + \gamma (17 \gamma_s / r_a) \right]}, \quad (6.10)$$

где φ — плотность воздуха; λ — скрытая теплота парообразования воды; E_a — скорость действительного суммарного испарения; R_n — суммарная радиация за минусом потока тепла в почву; Δ_x — наклон кривой «влажность–температура»; C_p — удельная теплоемкость при постоянном атмосферном давлении; v_e — дефицит давления пара воздуха; r_a — аэродинамическое сопротивление переносу водяного пара; γ_s — сопротивление покрова переносу воды и γ — психометрическая константа.

Процесс перехватывания моделируется как ёмкость перехвата, которая должна быть заполнена в течение периода поступления воды на поверхность. Размер ёмкости перехвата (I_{max}) зависит от типа растительности и ее стадии развития, которое характеризуется индексом листовой поверхности (LAI). Следовательно:

$$I_{max} = C_{int} \times LAI, \quad (6.11)$$

где C_{int} — коэффициент перехвата, который определяет способность перехвата растительностью. Типичное значение составляет примерно 0,05 мм, а более точное значение можно получить калибровкой. Отношение площади листьев к единице площади поверхности называется индексом листовой поверхности. Для различных типов зерновых культур были установлены обобщенные функции изменения индекса листовой поверхности во времени. Таким образом, при использовании таких инструментов моделирования как MIKE SHE, пользователь должен задать временное изменение индекса листовой поверхности для каждого типа зерновых в течение периода роста. Климатические условия изменяются от года к году, что может потребовать сдвинуть кривую индекса листовой поверхности во времени, но не изменит форму кривой. Обычно этот индекс изменяется в пределах от 0 до 7. Испарение с растительного покрова равно возможному суммарному испарению, если листьями было перехвачено достаточное количество воды, то есть:

$$E_{can} = \min I_{max} E_p \Delta t, \quad (6.12)$$

где E_{can} — испарение с растительного покрова; E_p — скорость потенциального суммарного испарения и Δt — длина временного шага моделирования.

Накопившаяся на поверхности почвы вода под влиянием силы тяжести стекает по склонам в русловую сеть, по которой она движется к замыкающему створу. Оба процесса описываются уравнениями нестационарного безнапорного потока, которые основаны на физических законах сохранения массы и количества движения (ДНІ, 1985).

В самом общем виде движение потока в ненасыщенной зоне может быть рассчитано с помощью уравнения Ричардса:

$$C = \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(K \frac{\partial \Psi}{\partial Z} \right) + \frac{\partial K}{\partial Z} + S, \quad (6.13)$$

где Ψ — напор; t — переменная времени; Z — вертикальная координата (положительное направление вверх); $C = \partial \Theta / \partial \Psi$ — влагоемкость почвы; Θ — запас воды в почве; K — гидравлическая проводимость; S — гидравлическая проводимость.

Интенсивность инфильтрации в почву определяется условиями на верхней границе, которые могут изменяться в зависимости от условий, регулируемых потоком, до условий, регулируемых состоянием почвы и ее насыщением, либо наоборот. Обычно нижней границей является уровень грунтовых вод. Основным уравнением, описывающим движение воды в зоне насыщения, является нелинейное уравнение Буссинеска:

$$S = \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x H \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y H \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R, \quad (6.14)$$

где S — удельная водоотдача; h — уровень подземных вод; K_x, K_y — удельная гидравлическая проводимость по осям x и y соответственно; H — мощность зоны насыщения; t — переменная времени; x, y — горизонтальные пространственные координаты; R — член уравнения, определяющий зависимость мгновенное пополнение/отток.

Уравнение (6.14) решается путем его аппроксимации системой уравнений в конечных разностях, т. е., применением закона Дарси совместно с уравнением баланса массы для каждой точки расчета. Рассматривая точку i внутри области моделирования, общий поток R с соседних точек и источников/стоков между промежутками времени n и $n+1$ выражается в следующем виде:

$$R = \sum q_z^{n+1} + \sum q_x^{n+1} + RH_i \Delta x^2, \quad (6.15)$$

где первый член в правой части — это объемный поток в вертикальном направлении, второй — объемный поток в горизонтальном направлении; R — объемная скорость потока на единицу объема из всех источников и стоков; Δx — пространственное

разрешение в горизонтальном направлении и H_i — глубина насыщения либо неограниченных слоев, либо толщина слоя для замкнутых слоев.

Блок снеготаяния в модели SHE представляет собой попытку моделирования притока массы и энергии внутри снежного покрова на основании учета изменений структуры снежного покрова. Два полуэмпирических уравнения используются для установления взаимосвязей, необходимых для определения распределения температуры и влагосодержания. Кроме того, эмпирические уравнения используются для определения гидравлических и термических свойств снега, определяющих его структуру, запас воды и температуру.

Недавно были разработаны несколько продуктов, связанных с SHE, в т. ч. MIKE SHE, SHETRAN или SHESED. В MIKE SHE остается основное описание процессов из оригинального SHE. Последний из названных пакетов (Storm and Refsgaard, 1996), расширенный по сравнению с SHE, используется для решения многих практических задач, среди которых моделирование стока, перенос растворенных веществ, приложения по планированию ирригации и минерализации, а также в управленческих моделях.

6.1.5 Оценивание параметров

Общие методы оценивания или идентификации параметров, иногда называемые калибровкой модели, разработаны для широкого диапазона динамических систем. Опыт показал, что успех этих методов зависит от наличия адекватной информации, касающейся свойств системы, и от вида функции влияния или реакции на импульс. Существуют два основных подхода к калибровке.

В первом подходе математическая модель объединяется с данными, чтобы выполнить параметризацию системы при неизвестных коэффициентах. Такая задача относится к категории некорректно поставленных обратных математических задач, которые трудно решить. В линейном случае может потребоваться обращение матрицы. Такие решения очень чувствительны к неточностям данных. Они приводят к неустойчивым и множественным решениям. Оптимум, найденный с помощью оптимизирующего программного обеспечения, может быть скорее локальным, чем глобальным.

Второй подход представляет собой эксперименты с различными комбинациями значений параметров с целью минимизировать или максимизировать принятый критерий оптимизации. Многочисленные подходы были разработаны специалистами по прикладной математике применительно к минимизации числа

вычислений, необходимых для оптимизации значений параметров. В гидрологии применяются градиентные и неградиентные методы. Адекватность решения может в значительной степени зависеть от критериев, используемых при анализе. Значительное число таких критериев было разработано и представлено в проектах ВМО (WMO, 1986, 1987, 1991a). Их можно рекомендовать для общего использования.

Следующие принципы рекомендуются для определения параметров комплексных, концептуальных гидрологических моделей, состоящих из нескольких компонентов:

- a) раздельное тестирование компонентов модели с использованием всей доступной экспериментальной и научной информации. Хорошо известно, что при определении всех без исключения параметров модели посредством оптимизации возможно получение нереальных значений параметров, иногда даже выходящих за пределы их физических границ. Это происходит в том случае, когда некоторые элементы модели содержат систематические ошибки, которые впоследствии компенсируются внутри модели. Для того чтобы избежать таких ситуаций, рекомендуется раздельно определять параметры комплексных концептуальных моделей для каждого основного компонента, а не глобально;
- b) использование для калибровки моделей данных не менее чем за трехлетний период и другого периода времени аналогичной продолжительности для верификации модели. Периоды для калибровки и верификации следует выбирать таким образом, чтобы они отражали характерные условия формирования стока, например паводок, вызванный дождями; половодье, вызванное снеготаянием, и низкий сток;
- c) в тех случаях, когда гидрологический режим бассейна находится под влиянием антропогенных воздействий, рекомендуется калибровать модель применительно к условиям естественного режима стока. Впоследствии значения некоторых параметров могут быть изменены для того, чтобы учитывались антропогенные воздействия. Проверка параметров модели должна быть выполнена по репрезентативному периоду, не затронутому деятельностью человека.

Параметры гидродинамических моделей представляют собой характеристики бассейна, например шероховатость склонов и речного русла, фильтрационная способность почвы и пористость почвы. В принципе, все эти параметры имеют физическую основу и определяются по данным полевых измерений, а не посредством оптимизации. Однако на практике это не всегда возможно.

6.1.6 Выбор моделей

Наряду с пакетами программного обеспечения, разработанными в Европе и Северной Америке, все более широко используются в международном контексте некоторые продукты из других стран. Например, получили международное признание две модели из Южной Африки. Агрогидрологическая система моделирования ACRU (Agricultural Catchments Research Unit), разработанная Шульцем в Университете Наталя в начале 1970-х годов, является многоцелевой интегральной физической концептуальной моделью стока, наносов и урожайности сельскохозяйственных культур. Модель Питмана типа «осадки–сток» для временных шагов, равных одному месяцу, широко использовалась в Южной Африке для целей стратегического планирования водных ресурсов (см. Hughes and Metzler, 1998). Недавно Хьюз (Hughes, 2004a) расширил модель Питмана, добавив два новых компонента: питание и расход грунтовых вод, таким образом отвечая на неотложную потребность в практической работе в инструменте для комплексного моделирования поверхностных и грунтовых вод, который можно будет применять для различных масштабов бассейнов в условиях южной части Африки.

Выбор моделей не ограничивается моделями, описанными выше. Существует много моделей, созданных научно-исследовательскими институтами и компаниями по выпуску коммерческого программного обеспечения. Часто бывает трудно установить относительные достоинства и недостатки моделей, разработанных для оперативных целей. Выбор модели, пригодной для конкретных гидрологических условий, имеет значение при планировании, освоении водных ресурсов и управлении ими; в гидрологическом прогнозировании и в определении направлений дальнейших исследований в области моделирования. При выборе моделей целесообразно учитывать следующие факторы и критерии:

- a) общая задача моделирования: гидрологическое прогнозирование с оценкой антропогенного воздействия и влияния изменения климата на естественный гидрологический режим;
- b) вид системы, которая моделируется: малый водосбор, водоносный горизонт, участок реки, водохранилище или крупный бассейн;
- c) моделируемый гидрологический элемент: паводки, среднесуточные расходы, среднемесячные расходы, уровни грунтовых вод, качество воды и т. д.;
- d) климатические и физико-географические характеристики водосбора;
- e) наличие сведений относительно типа, длины и качества данных, необходимых для калибровки и функционирования модели;
- f) простота модели в том, что касается сложности и простоты применения;

- g) возможная необходимость переноса параметров модели, полученных для малых бассейнов, на большие водосборы;
- h) способность модели к удобному обновлению применительно к текущим гидрометеорологическим условиям.

Полезную информацию и руководство по выбору и применению концептуальных моделей в различных гидрологических ситуациях можно найти в документации нескольких международных проектов ВМО, выполненных с 1970-х годов, а именно:

- a) взаимное сравнение концептуальных моделей, используемых при оперативном гидрологическом прогнозировании (WMO, 1987);
- b) взаимное сравнение моделей стока весеннего половодья (WMO, 1986);
- c) имитированное взаимное сравнение гидрологических моделей в режиме реального времени (WMO, 1991a).

Многие пакеты гидрологического программного обеспечения были разработаны научно-исследовательскими институтами и коммерческими компаниями для персональных компьютеров и автоматизированных рабочих мест, использующих системы MS Windows, UNIX и LINUX. Многие модели оборудованы интерфейсом ГИС.

Гидрологические модели из числа ГОМС объединены в многие разделы. Секция J (Гидрологические модели прогнозирования) включает модели, главная цель которых состоит в оперативном прогнозировании различных гидрологических элементов. Подраздел J04 (Прогнозирование стока на основании гидрометеорологических данных) включает в себя три модели: Сакраменто, резервуарную (танк) и HBV, рассмотренные в разделах 6.1.3.1–6.1.3.3.

На момент составления данного Руководства в число компонентов в этом подразделе ГОМС входят: J04.1.04 (Модель «снеготаяние–сток» (SRM)); J04.1.05 (Функциональные модели «приток-хранение-вытекание (ISO)); J04.2.01 (Концептуальная модель водосбора для прогнозирования паводков); J04.3.03 (Концептуальная модель накопления и таяния снега (NWSRFS-SNOW-17)) и J04.3.07 (Синтезированная вынужденная линейная система (SCLS)).

Подраздел J15 (Объединенные модели прогнозирования и маршрутизации речного стока) включает в себя компоненты J15.2.01 (Модель синтеза стока и регулирования водохранилищ (SSARR)) и J15.3.01 (Программа ручной калибровки (NWSRFS-MCP3)).

Другие модели объединены в раздел K (Гидрологический анализ для планирования и проектирования

гидротехнических объектов и водохозяйственных систем), например K15 (Изучение паводков на конкретных объектах) и K15.3.02 (Модели разрушения дамбы паводком (DAMBRK)). В подраздел K22 (Модели типа «осадки–сток») входят K22.2.02 (Пакет гидрографа паводка (HEC-1)), K22.2.10 (Гидрологические модели типа «осадки–сток» (HYRROM)), K22.2.11 (Единичные гидрографы и составляющие стока по данным об осадках, испарении и потоке (PC IHACRES)), K22.2.12 (Нелинейные модели осадки–сток (URBS)) и K22.3.01 (Модели «жидкие осадки–сток» для городских территорий (SWMM)). Подраздел K35 (Модели формирования и трансформации речного стока) включает следующие компоненты: K35.1.05 (Численные решения нелинейного метода Маскингама), K35.2.09 (Гидрология паводков, происходящих ниже плотин (HEC-IFH)), K35.3.06 (Система анализа рек (HEC-RAS)), K35.2.06 (Модель расчета профиля водной поверхности (WSPRO)), K35.3.13 (Модель динамики потока на отдельном участке (BRANCH)) и K35.3.14 (Модель стока для одномерной системы открытых каналов, основанная на методе диффузной аналогии (DAFLOW)). Подраздел K 55 (Исследования качества воды) включает в себя следующие компоненты: K55.2.04 (Модель переноса для одномерной системы открытых каналов (BLTM)), K55.2.06 (Моделирование концентрации фекальной кишечной палочки в потоке), K55.3.04 (Математическая модель двумерного распределения солености в эстуариях) и K55.3.07 (PC-QUASAR — Моделирование качества воды по течению рек).

Раздел L (Подземные воды) включает в себя подраздел L20 (Модели формирования водоносных горизонтов) со следующими компонентами: L20.2.04 (Модульная модель конечных дифференциальных уравнении движения подземных вод (MODFLOW)), L20.3.05 (Модель для ненасыщенного потока над неглубоким уровнем грунтовых (MUST)), L20.3.13 (Полный программный пакет для моделирования подземных вод (TRIWACO)), L20.3.07 (Траектории и время движения на основе аналитических решений (AQ-AS)), L20.3.10 (Снижение напора грунтовых вод на основании аналитических решений (AQ-AP)), L20.3.11 (Имитационная модель водоносного слоя), L20.3.12 (SGMP — Моделирование поведения уровня грунтовых вод в системах грунтовых вод) и L20.3.14 (MicroFEM — Модели конечных элементов устойчивого состояния нескольких водоносных горизонтов и моделирование переходных потоков грунтовых вод).

6.2 АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

Многие гидрологические данные состоят из временных рядов наблюдений за гидрологической переменной в одной точке пространства. Изучение единичного

временного ряда гидрологических данных позволяет определить временную структуру корреляции этой переменной в данной точке пространства. Если на станции наблюдается более одной переменной, необходимо рассматривать взаимную корреляцию между временными рядами нескольких переменных в одной и той же точке. Рассматривая временные ряды одной и той же переменной в нескольких точках пространства, необходимо изучать пространственно-временное поле этой переменной и проверять кросс-корреляцию между временными рядами той же переменной в различных точках пространства. Это позволяет объяснить временную и/или пространственно-временную структуру гидрологического процесса и использовать это в создании искусственного стока и расширенных данных, например заполнение пробелов в данных и экстраполяция.

Гидрологические временные ряды могут быть непрерывными; в этом случае они получены непрерывно записывающим устройством дискретными, потому что они выбраны в дискретные временные моменты через равные или неравные временные интервалы, или квантованными, если каждое значение временного ряда является интегралом переменной за определенный интервал времени. Непрерывные временные ряды можно анализировать во временной или операционной области, например с помощью интегральных преобразований Фурье или Лапласа, которые в конкретных случаях удобно использовать.

При изучении гидрологических временных рядов важно использовать подходящие временные промежутки. Данные могут быть часовые, суточные, месячные или годовые, но при решении некоторых задач может быть необходимо использовать временной интервал, обусловленный периодом сбора данных, или более длинный период, требующий объединения, либо более короткий период, требующий разделения. Это влияет на характеристики рядов. Ряды часовых значений стока могут содержать высоко коррелированные значения, в то время как коэффициент корреляции в рядах среднегодовых значений может быть равным нулю.

Аналізу временных рядов посвящено большое количество литературы, в том числе монументальная монография Бокса и Дженкинса (Box and Jenkins, 1970). Гидрологическое применение анализа временных рядов можно найти в работе Саласа (Salas, 1992). Элементы анализа временных рядов широко включены в общецелевые статистические пакеты программного обеспечения. В настоящем разделе кратко описаны практические проблемы в этой области, связанные со стохастическим моделированием и обнаружением изменений в гидрологических записях наблюдений.

6.2.1 Стохастическое моделирование гидрологических временных рядов

Стохастические модели — это модели «черного ящика», параметры которых оцениваются, исходя из статистических свойств наблюдаемых временных рядов. Стохастические методы были впервые введены в гидрологию в связи с проектированием водохранилищ. Объемы месячного или годового стока являются достаточно подробной информацией для этой цели, но при расчете регулирующей емкости водохранилища должна учитываться также вероятность наступления критических последовательностей стока, которая наилучшим образом может быть оценена с использованием последовательных рядов стоковых характеристик. Каждая последовательность должна охватывать многолетний период и отражать свойства генеральной совокупности, поскольку она используется для получения статистических характеристик. Устойчивость статистических свойств многолетнего ряда является основным требованием при выборе соответствующей стохастической модели. Намного труднее осуществлять одновременное моделирование стоковых рядов для двух или большего количества стоков водохранилища в бассейне реки из-за необходимости сохранения внутрирядных корреляционных связей. Стохастическое моделирование применялось также для определения доверительных границ при прогнозировании стока в реальном масштабе времени. Такие приложения в дальнейшем не рассматриваются. Проектирование и работа водохранилищ рассмотрены в разделе 4.2.

6.2.1.1 Марковские модели 1-го порядка

Многие модели для имитации месячного, сезонного или годового стока предполагают использование марковской модели 1-го порядка, когда величина стока за любой период определяется стоком за предшествующий период и случайным импульсом. Одна из таких моделей для месячного стока может быть представлена следующим образом:

$$Q_i = \bar{Q}_j + \rho_j \frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}} (Q_{i-1} - \bar{Q}_{j-1}) + \varepsilon_i \sigma_j \sqrt{1 - \rho_j^2}, \quad (6.16)$$

где Q_i — значение расхода воды i -го члена ряда, последовательно пронумерованного начиная от 1 независимо от месяца или года; j — номер месяца, на который приходится i -й член ряда, \bar{Q}_j — средний расход за j -месяц, σ_j — стандартное отклонение для j -го месяца; ρ_j — коэффициент внутрирядной корреляции между Q_j и Q_{j-1} ; ε_i — случайная переменная соответствующего распределения, имеющая нулевое среднее значение, единичную вариацию и являющаяся независимо распределенной.

Уравнение (6.16) может также использоваться для моделирования сезонного стока ($j = 1, 2, 3, 4$) и годового стока ($j = 1$). В последнем случае оно становится уравнением:

$$Q_i = \bar{Q}_j + \rho (Q_{i-1} - \bar{Q}_{j-1}) + \varepsilon_i \sigma \sqrt{1 - \rho^2}. \quad (6.17)$$

Предполагается, что \bar{Q} , σ и ρ , определяемые по ряду исторических наблюдений, удовлетворяют поставленным целям, и необходим только выбор начального значения Q_{i-1} для моделирования ряда любой длины. Обычно используется метод Монте-Карло с вычислением последовательных величин случайных переменных с помощью компьютера. В принципе, разработка и применение моделей, описываемых уравнением (6.16), задача относительно нетрудоемкая и простая. Тем не менее, существуют несколько вопросов, требующих тщательного рассмотрения, и решения, которые могут стать критически важными для изучаемой проблемы:

- Каково распределение случайной переменной?
- Следует ли корректировать дисперсию при внутрирядной корреляции, если таковая имеет место?
- С какой точностью рассчитывать величину коэффициента внутрирядной корреляции?

6.2.1.2 Авторегрессионные модели со скользящим средним

Наиболее значительное развитие в работах Бокса и Дженкинса (Box and Jenkins, 1970; Hipel and others, 1977) получили одномерные стохастические модели, относящиеся к группе авторегрессионных моделей со скользящим средним (ARMA).

Существуют три типа таких моделей: авторегрессионная (AR), модель скользящего среднего (MA) и смешанная модель (ARMA). Самый общий тип (ARMA) порядка p и q и модель скользящего среднего (MA) порядка q имеют, соответственно, следующий вид:

$$x_i = \phi_1 x_{i-1} + \phi_2 x_{i-2} + \dots + \phi_p x_{i-p} + \varepsilon_i \quad (6.18)$$

$$- \theta_1 \varepsilon_{i-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{i-q}, \quad (6.19)$$

$$x_i = \varepsilon_i - \theta_1 \varepsilon_{i-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{i-q},$$

где x_i — отклонение i -го наблюдения от среднего значения ряда; ϕ_j и θ_j — параметры, которые следует оценить; ε_i — случайная переменная, описанная выше (см. раздел 6.2.2.1).

Для расчета по ARMA-моделям была разработана последовательная процедура (Box and Jenkins, 1970):

- идентификация: коррелограмма исследуемых рядов сравнивается с автокорреляционной функцией различных ARMA-моделей для выбора подходящего типа и порядка модели;

- b) оценивание: параметры модели оцениваются (Salas, 1992) с помощью методов моментов, наибольшего подобия или наименьших квадратов при условии, что сумма квадратов отклонений минимальна;
- c) диагностическая проверка: отклонения проверяются на случайность, для того чтобы подтвердить адекватность выбранной модели.

ARMA-модели используются для того, чтобы смоделировать последовательные искусственные ряды стока с помощью метода Монте-Карло, описанного выше. Следует еще раз отметить, что методы стохастического моделирования должны использоваться с осторожностью и критическим рассмотрением имеющихся данных наблюдений, что весьма важно для водохозяйственного проектирования.

6.2.1.3 Модели дробного гауссовского шума и нелинейных процессов

Открытое Херстом (Hurst, 1951) несоответствие характеристик, демонстрируемых длительными рядами наблюдений, с марковским стационарным процессом привело к разработке двух стохастических моделей, которые могут воспроизводить длительно устойчивые или низкочастотные элементы. Первая из них — модель дробного гауссовского шума (FGN) (Mandelbrot and Wallis, 1968) представляет собой самовоспроизводящийся случайный процесс, характеризуемый функцией спектральной плотности с особым упором на очень низкие частоты, типичные для эффекта Херста. Также было показано, что долгопериодные модели нелинейных процессов сохраняют эффект Херста (Rodriguez-Iturbe and others, 1972; Mejia and others, 1972).

Херстом найдено отсутствие необходимости подтверждения устойчивости длительных рядов, и, кроме того, некоторые варианты ARMA-моделей способны моделировать существенно более низкочастотные эффекты. Нестационарность хода среднего значения может также проявиться в характеристиках, которые Херст обнаружил при анализе длительных рядов наблюдений, независимо от того, явились ли они результатом климатических изменений, антропогенной деятельности или просто неоднородности рядов наблюдений.

6.2.2 Обнаружение изменений в рядах гидрологических наблюдений

6.2.2.1 Введение

Обнаружение изменений в долгосрочных рядах гидрологических данных является вопросом значительной научной и практической важности. Он является фундаментальным для планирования будущих водных

ресурсов и защиты от паводков. Если в гидрологической системе происходят изменения, необходимо проверить существующие процедуры проектирования таких сооружений, как водохранилища, дамбы и плотины, иначе эти системы станут пере- или недопроектированными и не будут выполнять свои функции или станут дороже, чем это необходимо.

Мероприятия, предпринятые в рамках Всемирной климатической программы — Вода (WMO, 1988) привели к принятию общих рекомендаций по методологии, применяемой для обнаружения изменений в гидрологических данных, представленных Кавадиасом (WMO, 1992) и Кундцевичем и Робсоном (WMO, 2000, 2004). Настоящий раздел основан на двух последних упомянутых работах, к которым можно обратиться за более подробными рекомендациями, касающимися различных компонентов процесса обнаружения изменений.

6.2.2.2 Основные статистические проверки обнаружения изменений

Изменения во временных рядах могут происходить по-разному: постепенно (тенденция), внезапно (пошаговое изменение) или в более сложной форме. Они могут влиять на среднее значение, медиану, дисперсию, автокорреляцию или другие аспекты данных.

Для того чтобы выполнить статистическую проверку, необходимо определить нулевую и альтернативную гипотезы, которые описывают, какая проверка выполняется. Например, для проверки на тренд среднего значения ряда нулевой гипотезой должно быть утверждение, что в средних значениях ряда нет изменений, а альтернативной гипотезой — среднее уменьшается или увеличивается с течением времени. Для проведения проверки необходимо сначала предположить, что нулевая гипотеза верна. Следующий шаг — проверить, согласуются ли данные наблюдений с этой гипотезой. Если нет, то нулевая гипотеза отвергается.

Для сравнения нулевой и альтернативной гипотез выбирается проверочная статистика и оценивается ее значимость, основанная на имеющихся доказательствах. Тестовая статистика представляет собой просто численное значение, которое рассчитывается из проверяемого ряда данных. Удачная тестовая статистика должна подчеркивать разницу между двумя гипотезами. Простым примером тестовой статистики является градиент линейной регрессии, который можно использовать для проверки тренда среднего. Если тренда нет (нулевая гипотеза), градиент регрессии должен иметь значения, близкие к нулю. Если наблюдается большой тренд среднего (альтернативная гипотеза), то значение градиента регрессии сильно отличается от нуля: положительно для возрастающего тренда и отрицательно для убывающего.

Уровень значимости показывает, отличается ли тестовая статистика от диапазона значений, которые обычно наблюдаются при нулевой гипотезе. Это вероятность того, что проверка ошибочно определяет тренд, когда он отсутствует; это называется ошибкой первого типа. Ошибка второго типа возникает, когда принимается первая гипотеза — нет тренда, когда на самом деле имеется альтернативная гипотеза (тренд существует). Сила теста заключается в вероятности правильного обнаружения тренда, когда он представлен; мощные проверки с низкой вероятностью ошибок второго типа более предпочтительны.

При выполнении статистических проверок всегда необходимо учитывать предположения. Стандартные проверки требуют некоторых или всех следующих предположений: особая форма распределения, например, предполагающая, что данные нормально распределены; постоянство распределения, при котором все точки данных имеют идентичное распределение так, что нет сезонных вариаций или любых других циклов в данных; и независимость. Последнее предположение нарушается, если есть автокорреляция, а именно корреляция между значениями в разные моменты времени. Это также относится к корреляции рядов или временной корреляции, или в случае исследования в нескольких местах — к пространственной корреляции, в частности корреляции между отдельными пунктами наблюдений.

Если предположения, сделанные при статистических проверках, не выполняются по итогам данных, тогда результаты проверки могут быть бесполезными, в том смысле, что оценки уровня значимости будут весьма неправильными. Гидрологические данные обычно распределены ненормально; это значит, что проверки, которые предполагают нормальное распределение, будут неточными. Гидрологические данные могут также характеризоваться автокорреляцией и/или пространственной корреляцией; поэтому значения данных не являются независимыми. Это может негативно влиять на возможность обнаруживать тренд временных рядов (Yue and others, 2003). Данные могут также отображать сезонность, которая нарушает предположение о постоянстве распределения. Эффективность проверок зависит от размера выборки, изменчивости временных рядов, значимости тестируемой характеристики, например, тренда, распределения или асимметрии временного ряда. Результаты тестов по Мэнн-Кендаллу и Спирману приведены в работах Ю и др. (Yue and others, 2002) и Ю и Пилон (Yue and Pilon, 2004).

Главными этапами статистической проверки являются следующие:

- a) решить, какой тип ряда или переменной необходимо проверить в зависимости от интересующих задач, например данные о среднемесячных,

максимальных годовых значениях или данные без сезонной составляющей;

- b) определить рассматриваемый тип изменений (тренд/пошаговое изменение);
- c) проверить предположения о данных, например с помощью разведочного анализа данных;
- d) выбрать одну или несколько тестовых статистик, которые подходят каждому типу изменений; предпочтителен выбор нескольких статистик;
- e) выбрать подходящий метод оценивания уровней значимости;
- f) оценить уровни значимости;
- g) изучить и проанализировать результаты.

Процесс выбора статистической проверки может рассматриваться как состоящий из двух частей: выбор тестовой статистики и выбор метода определения ее уровня значимости. Рассматривая этот процесс таким образом, можно разделить процесс выбора статистики и оценки уровня значимости.

6.2.2.3 Непараметрическое тестирование

Существует много способов проверки гидрологических данных на наличие тренда или других изменений. В особой группе методов, относящихся к непараметрическим методам, нет необходимости в предположениях о форме распределения данных совокупности, из которой берутся данные, например о том, что они распределены нормально. Следующие подходы являются непараметрическими:

- a) Ранговые тесты: эти тесты используют разряды значений данных, но не сами действительные значения. Точка данных имеет разряд r , если она является наибольшим r -м значением в наборе данных. Большинство тестов данного вида предполагают, что данные независимы и распределены идентично. Преимуществом ранговых тестов является их устойчивость к ошибкам и легкость в использовании. Обычно они менее эффективны, чем параметрические.
- b) Тесты, использующие многократные нормирующие преобразования: многие тесты на изменения опираются на предположение о нормальности. Обычно они не подходят для прямого применения к гидрологическим данным, распределение которых чаще всего далеко от нормального. Однако эти тесты можно использовать, если данные предварительно преобразовать. Многократные нормирующие преобразования позволяют получить набор данных с нормальным распределением. Это похоже на использование разрядов в рядах данных, но вместо замещения значений данных их разрядом r , значение заменяется типичным значением, которое имело бы r -ое наибольшее значение из выборки нормально распределенных данных (r -ое нормальное значение). Преимуществами использования этого

метода является то, что начальные исходные данные могут не подчиняться закону нормального распределения, и устойчивость этого теста к ошибкам при работе с экстремальными значениями. К недостаткам относится то, что сложно объяснять статистику, показывающие изменения исследуемой величины, например градиент регрессии. Тесты этого типа немного более эффективны в использовании, чем ранговые тесты.

- с) Тесты, использующие методы повторной выборки: представленные ниже методы — это методы, использующие данные для определения значимости тестовой статистики.

6.2.2.4 Введение в методы повторной выборки

Методы повторной выборки, проверка перемещений и метод бутстрапа представляют собой надежный набор методов оценки уровня значимости тестируемой статистики. Они являются весьма гибкими, их можно применять к широкому спектру типов данных, включая автокоррелированные или сезонные данные, и эти методы относительно эффективны. Методы повторной выборки очень полезны при проверке гидрологических данных, поскольку они требуют относительно немного предположений о данных; тем не менее они достаточно действенны. Они обеспечивают гибкую методологию, которая позволяет оценивать уровни значимости для любой выбранной тестовой статистики. Они дают возможность применять традиционные статистические тесты для обработки временных рядов с помощью надежного метода определения значимости.

Основная идея, стоящая за методами повторной выборки, очень проста. Рассмотрим проверку ряда на наличие тренда: возможный тест — градиент регрессии. Если в данных тренда нет (нулевая гипотеза), тогда порядок величин значений ряда не должен значительно влиять на тест. Следовательно, переупорядочивание или перестановка элементов ряда данных не должна сильно изменить градиент. При таком подходе данные перетасовываются многократно. Тестовая статистика пересчитывается после каждого перемешивания или перестановки. После многочисленных перестановок начальная тестовая статистика сравнивается с полученными значениями статистики. Если начальная тестовая статистика существенно отличается от большинства полученных значений, это указывает на то, что упорядочение данных влияет на градиент и что тренд был. Если начальная тестовая статистика находится где-то посередине полученных значений, то разумно предположить, что нулевая гипотеза верна в том, что порядок величин не играет никакой роли; следовательно, нет доказательств тренда. Другими словами, если наблюдатель или, в этом случае, статистическая проверка может различить начальные и

повторно выбранные или переупорядоченные данные, то наблюдаемые данные не соответствуют нулевой гипотезе.

Методы бутстрапа и переупорядочивания представляют собой два разных подхода к повторной выборке данных. В методах переупорядочивания выборка производится без замещений, данные упорядочены заново, т. е. каждое значение данных исходного ряда появляется только один раз в новом или полученном ряду. В методах бутстрапа исходные ряды данных выбираются с заменами для того, чтобы получить новый ряд с тем же самым количеством значений, что и в исходном ряду. Ряды, полученные с помощью этого метода, могут содержать более одного значения из исходного ряда и ни одного другого значения. В обоих случаях полученный ряд имеет то же самое распределение, что и эмпирический наблюдаемый ряд. Вообще методы бутстрапа более гибкие, чем методы переупорядочивания, и их можно использовать в большем числе случаев.

Самой простой стратегией повторной выборки является переупорядочивание или «бутстрап» индивидуальных данных, как описано выше. Этот метод применим только тогда, когда можно предположить, что данные являются независимыми и несезонными. Если данные отражают автокорреляцию или дополнительные свойства, такие как сезонность, ряды, полученные с помощью повторной выборки должны тоже повторять эти свойства. Прямым средством достижения этой цели является переупорядочивание или метод бутстрапа данных блоками. Например, 40-летний ряд среднемесячных значений разумнее было бы рассматривать как данные, состоящие из 40 блоков продолжительностью в один год. Значение данных каждого года остаются нетронутыми и перемещаются вместе как блок, поддерживая таким образом сезонные и временные зависимости в пределах одного года. Затем 40 блоков переупорядочиваются много раз. Таким образом повторно выбранные ряды будут сохранять начальную сезонность. Похожим образом можно заставить блоки воспроизводить автокорреляцию данных. Важно, чтобы размер блоков был выбран правильно.

Многие непараметрические проверки, например рядные, зависят от предположений о независимости. Если это предположение не выполняется, как чаще всего бывает при работе с гидрологическими данными, рекомендуется извлечь тестовую статистику из этих проверок и оценить значимость с помощью метода бутстрапа или переупорядочивания блоков, а не использовать классические формулы для оценки значимости, которые могут привести к грубым ошибкам. Такие методы полезно использовать, если в наборе данных с различных площадок прослеживается пространственная зависимость, т. е. эти данные

можно проверять как группу. В этом случае блоком будут являться данные, сгруппированные по всем площадкам, полученные в один и тот же промежуток времени (например, Robson and others, 1998).

6.2.2.5 **Общепринятые тесты и тестовые статистики**

В таблице II.6.1 кратко представлены стандартные параметрические и непараметрические тесты на обнаружение изменений, их основных свойств и необходимые предположения. Эти тесты описаны в их стандартной форме, а именно не в формате повторной выборки. Каждый из этих тестов можно использовать как проверку повторной выборки. Для этого рассчитывают тестовую статистику для проверки, а уровень значимости получают с помощью метода, описанного выше. Руководящие указания по выбору теста приведены в таблице II.6.2.

Заметим, что если используется метод повторной выборки, то можно составить новую тестовую статистику для конкретного типа изменений в этом тесте — если не нужно выбирать тестовую статистику из известных тестов. Тестовую статистику можно использовать в различных случаях в зависимости от того, что проверять и зачем.

При толковании результатов теста необходимо помнить о том, что статистическая проверка не идеальна, даже если выполняются все предположения. Следовательно, рекомендуется использовать более одного теста. Если несколько тестов дают значимые результаты, то это доказывает наличие изменений, если только они не идентичны, и тогда многократное доказательство значимости не является дополнительным подтверждением изменений.

Таблица II.6.1. Сравнение параметрических и непараметрических проверок для обнаружения изменений, их свойства и сделанные предположения (Kundzewicz and Robson, 2004)

<i>Название проверки</i>	<i>Что делает</i>	<i>Свойства и сделанные предположения</i>
Проверка на ступенчатое изменение		
Проверка на разладку медианы/тест Петтитта	Тест, который выявляет изменения в медиане ряда с точным временем искомого изменения	Мощный, основанный на ранжировании тест, надежно проверяет изменения в форме распределения
Проверка по критерию Манна-Уитни/тест сумм номеров ранжированного ряда	Тест, который выявляет различия между двумя независимыми выборками, основан на статистическом критерии Манна-Кендалла	Критерий, основанный на ранжировании
Непараметрическая (не зависящая от распределения) проверка CUSUM (максимальная совокупная сумма)	Тест, в котором последовательные наблюдения сравниваются с медианой ряда с максимальной совокупной суммой признаков различия от медианы как статистический критерий	Критерий, основанный на ранжировании
Проверка по критерию Крускала-Уоллиса	Тестирование равенства средних значений подпериодов	Критерий, основанный на ранжировании
Проверка накопленных отклонений и другие CUSUM-тесты	Тест работает с ремаштабированными совокупными суммами отклонений от среднего	Параметрический критерий; предполагается нормальное распределение
Проверка по критерию Стьюдента	Проверка на то, имеют ли обе выборки различные средние – принимают нормально распределенные данные и известный период критических точек	Стандартный параметрический критерий; предполагается нормальное распределение
Проверка по критерию отношения правдоподобия Уорсли	Подходит для использования, когда точка разладки неизвестна	Подобный критерию Студента; предполагается, что время распределено нормально
Проверки на наличие тренда		
Проверка, основанная на расчете коэффициента ранговой корреляции Спирмена	Проверка на корреляцию между временным и ранжированным рядами	Критерий, основанный на ранжировании
Тау-тест Кендалла/тест Манна-Кендалла	Подобен тесту ранговой корреляции Спирмена, но использует другую меру корреляции без параметрического аналога	Критерий, основанный на ранжировании — существуют расширенные критерии, учитывающие сезонность, например, Hirsch и Slack (1984) — и автокорреляция
Линейная регрессия	Используется градиент регрессии как статистический критерий	Один из самых общих критериев на тренд; предполагается нормальное распределение

Примечание. Все критерии предполагают, что данные одинаково распределены и независимы.

Важно проверять результаты теста вместе с графиками данных и максимально возможными историческими сведениями о данных. Например, если получены значимые результаты о ступенчатом изменении и тренде, необходимо определить какая дополнительная информация потребуется, чтобы определить, какие из них дают лучшее описание этого изменения. Если исторические исследования показывают, что дамба была построена в рассматриваемый период, и это совпадает с графиком временных рядов, то разумно сделать вывод о том, что дамба явилась причиной ступенчатого изменения.

Если результаты теста предполагают, что в рядах данных есть значительное изменение, важно попробовать выяснить его причину. Хотя исследователь заинтересован в выявлении изменения климата, могут существовать и другие возможные объяснения, которые необходимо проверить (Kundzewicz and Robson, 2004). Полезным может быть выявление закономерностей в результатах, которые могут показывать прочие особенности, например региональные составляющие тренда.

6.2.3 Пространственный анализ в гидрологии

Гидрологические переменные могут формировать случайное пространственно-временное поле, например набор временных рядов значений переменной для некоторого числа пунктов измерений. Пространственное поле описывает дискретные наблюдения переменной в одно и то же время мгновенно в нескольких точках пространства или данные дистанционного зондирования, покрывающего всю площадь. Пространственные аспекты случайных полей, таких как количество осадков, уровень грунтовых вод или концентрация химических веществ в грунтовых водах, являются важными вопросами в гидрологии.

Геостатистика — это набор методов статистической оценки величин, изменяющихся в пространстве. Она легко приспособляется к применениям в случайных

пространственных полях, таких как качество осадков или грунтовых вод, следовательно, применима для решения широкого спектра гидрологических проблем (см. Kitanidis, 1992). Геостатистика предлагает решения некоторых практических задач, которые имеют большое значение в гидрологии. Ее можно использовать при интерполяции, например, как оценку значения для местности, на которой не ведутся измерения, основываясь на наблюдениях по нескольким соседним станциям или составлении контурной карты на основании информации о неравномерно расположенных точках. Она помогает решить проблемы агрегирования: нахождение оценок площади по точечным наблюдениям, например определение площади осадков на основе значений в точках. Геостатистика может помочь в проектировании сетей мониторинга, например при оптимальном расширении, или чаще, к сожалению, сокращении сети. Такие применения отвечают на вопрос: как сократить сеть с наименьшими информационными потерями. Используя геостатистику для исследования грунтового стока или моделей переноса, можно решить, например, обратную задачу определения пропускной способности по наблюдаемому гидравлическому напору.

Основную проблему метода геостатистического криджинга можно сформулировать как поиск лучшей линейной несмещенной оценки (BLUE) количества на некоторой территории, на которой не ведутся измерения x_0 , из наблюдений $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$ в ряде пунктов x_1, x_2, \dots, x_n :

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (6.20)$$

где $Z(x_0)$ — оценка $z(x_0)$ и λ_i — весовые коэффициенты.

В соответствии с так называемой истинной гипотезой отклонение оценок можно выразить с помощью математического уравнения, содержащего веса из уравнения (6.20) и значения полувариограммы. Определяются

Таблица II.6.2. Инструкции по выбору теста

Случай	Какой тест выбрать
a) Данные нормально распределены и независимы.	Это маловероятный сценарий для гидрологических данных. В случае применимости должен подходить любой из критериев, перечисленных в таблице II.6.1.
b) Данные распределены ненормально, но являются независимыми и несезонными.	Подходит любой из непараметрических тестов. Тесты, которые основаны на предположении нормального распределения, могут также быть применены в первую очередь с использованием нормальных отметок или преобразования рангов, или при использовании соответствующего статистического критерия и оценки использования значения, применяя методы повторной выборки.
c) Данные распределены ненормально и являются зависимыми или сезонными.	Данные не соответствуют предположениям для любого из основных тестов, представленных выше. Необходимо извлечь статистический тест и оценить уровни значимости, используя методы перестановки блоков или «расшнурованной выборки».

наборы весов, дающие оптимальную оценку при ее минимальном отклонении. Важное преимущество метода криджинга заключается в том, что он позволяет получить не только оценочное значение, но также и оценки отклонений. Эта полезная техника вычислений первоначально использовалась в горнодобывающей промышленности, где наблюдения затратны и вследствие этого весьма редки, когда первостепенное значение имеет оптимальная организация имеющихся данных.

Сегодня геостатистика стала важным элементом распределенного моделирования в географических информационных системах и опцией в пакетах программного обеспечения, предназначенного для интерполяции.

6.3 **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ** [ГОМС J04, K22, K35, K55, L20, L30]

6.3.1 **Введение**

Гидрологический цикл связан с циркуляцией воды на Земле. Он включает многочисленные потоки воды между различными резервуарами гидросферы. Примерами водных потоков гидрологического цикла могут служить жидкие и твердые осадки, инфильтрация, сток, снеготаяние, сток рек и суммарное испарение. Примерами соответствующих резервуаров являются атмосфера; поверхность земли, например низменности, пруды, озера и реки; растительность; почва; водоносные горизонты и снежный покров.

Все гидрологические процессы и системы описаны математическими уравнениями, некоторые из которых выведены из точных физических законов сохранения массы и количества движения. Другие имеют или концептуальное происхождение, или относятся к типу «черного ящика». Полный обзор математических уравнений, используемых в динамической гидрологии, можно найти в трудах Иглсона (Eagleson, 1970). В этом разделе приведено несколько иллюстративных примеров, относящиеся к дождевому стоку, трансформации паводочной волны, грунтовым водам, качеству воды, снежному покрову и ледовым явлениям.

Гидрологическое моделирование вносит все больший вклад в интегральные модели. Помимо моделирования стока с помощью интегральных моделей можно рассматривать эрозию почвы, речные наносы, экогидрологию, урожайность; они связаны с другими дисциплинами, такими как экогидрология, оценивание влияния климата и управление водными ресурсами.

6.3.2 **Взаимосвязи осадков и стока**

6.3.2.1 **Общие положения**

Зависимости между осадками и стоком прежде всего используются для проектирования, прогнозирования и расчетов. Если данные о речном стоке отсутствуют или количество их является недостаточным для надежной интерпретации, большую пользу могут оказать зависимости между осадками и стоком, поскольку они позволяют получить информацию о стоке на основании данных наблюдений за осадками. Поскольку сбор данных о дождевых осадках относительно прост и не требует больших финансовых затрат, этих данных, как правило, имеется гораздо больше, чем данных о стоке. Если для исследуемого водосбора можно установить достаточно тесную связь между осадками и стоком, такая связь в сочетании с данными о дождевых осадках может дать более надежную оценку частоты случаев высокого стока, чем региональная формула по расчету паводка (см. главу 5) или экстраполяция на основании скудных данных о стоке.

Зависимости между осадками и стоком обычно разрабатываются для двух отдельных этапов: определение объема стока, который образуется за счет выпадения данного объема осадков в течение данного периода времени, и распределение этого объема стока во времени. Первый этап необходим потому, что нужно расчленить выпавшие дождевые осадки на суммарное испарение (см. том I, глава 4), инфильтрацию и сток. Второй этап требуется для оценки времени добегания и спада паводочной волны, образуемой при выпадении осадков. Обсуждению этих двух этапов и посвящена остальная часть данной главы.

6.3.2.2 **Объемы стока**

6.3.2.2.1 **Индекс предшествующего увлажнения**

Индекс предшествующего увлажнения был разработан, главным образом, для целей прогнозирования речного стока и широко применяется для различных водосборов и разных условий. Применение его для конкретного бассейна требует наличия данных наблюдений за дождевыми осадками и стоком за какой-то период времени. Он определяется по уравнению:

$$I_t = I_0 k^t + \sum P_i k^{t(i)}, \quad (6.21)$$

где I_0 — начальное значение индекса; k — коэффициент спада; t — расчетный интервал времени; P_i — количество суточных дождевых осадков, выпавших в течение этого интервала времени; и $t(i)$ — число дней, прошедших после каждого дня с осадками.

Часто для удобства используются упрощенные формы индекса предшествующего увлажнения. В некоторых

бассейнах та или иная переменная может иметь настолько незначительное влияние, что ею можно пренебречь и, таким образом, сократить число этих переменных. Однако в любом случае основной метод остается тем же.

Влияние растительного покрова, типа почв, а также других важных характеристик водосбора и времени года, учитывается при выборе значения коэффициента спада. Время года отражается семейством кривых, представляющих сезонный ход солнечной энергии, состояния растительности и других факторов, которые оказывают влияние на испарение и транспирацию влаги в бассейне. Индекс предшествующего увлажнения является показателем количества влаги на водосборе и в почве.

Рисунок II.6.6 демонстрирует пример поведения индекса предшествующего увлажнения для суточного коэффициента спада равного 0,9. Индекс предшествующего увлажнения может быть рассчитан на базе среднего количества осадков для нескольких станций или индивидуально для каждой станции на водосборе. Последний метод в большинстве случаев более предпочтителен.

Рисунок II.6.7 иллюстрирует метод оценки объема стока по ливневым осадкам и индексу предшествующего увлажнения. Пунктирными линиями и стрелками показано, как пользоваться этим графиком.

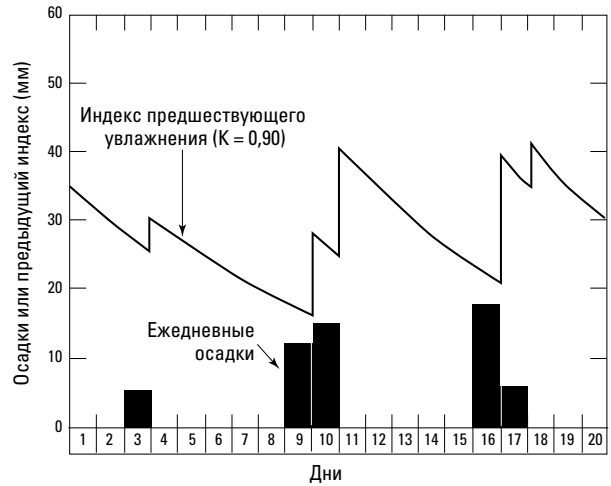


Рисунок II.6.6. Индекс предшествующего увлажнения

Например, график начинается с величины 22 мм для индекса предшествующего увлажнения. Длинные штрихи и стрелки приводят к июлю месяцу, а затем идут вниз к прямой линии, соответствующей ливню продолжительностью 24 часа. Затем они идут вправо до линии, соответствующей ливню в 40 мм, и вверх до пересечения со шкалой в точке, соответствующей среднему слою стока с водосбора, равному 16 мм.

Если гипотетический ливень в предыдущем примере прошел в феврале, то при прочих равных условиях

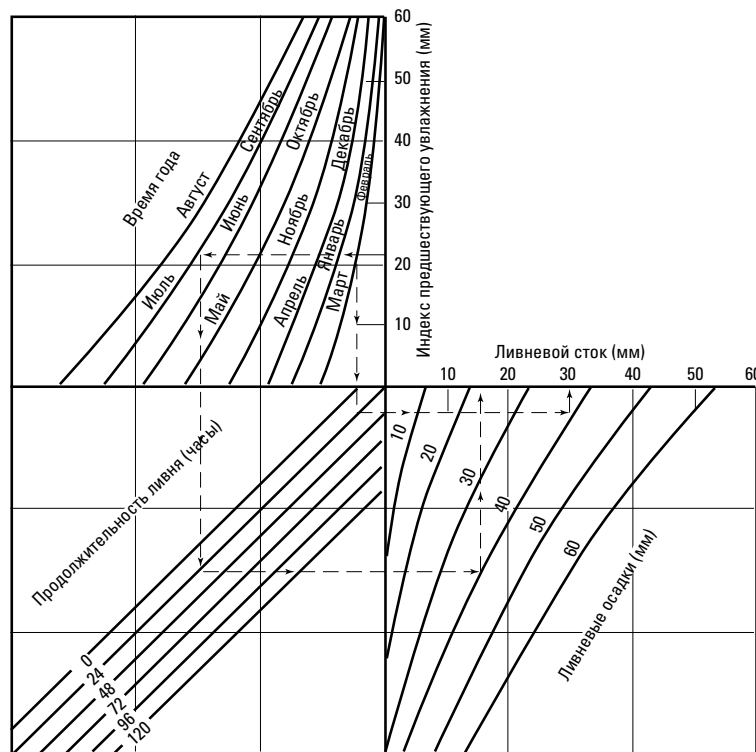


Рисунок II.6.7. Использование индекса предшествующего увлажнения для оценивания дождевого стока

влияние предшествующего увлажнения, равного 22 мм, будет другим. Обычно в феврале, в отличие от июля, та же самая степень предшествующего увлажнения ведет к большему насыщению почвы, потому что растительность находится в состоянии покоя, а предшествующее суммарное испарение зимой ниже. Короткие штрихи и стрелки на рисунке II.6.7 показывают, что сток, образованный ливнем в 40 мм, во втором примере составит 30 мм, т. е. почти в два раза выше, чем в июле.

При наличии мерзлой почвы и снежного покрова к оценке предшествующего увлажнения требуется специальный подход. В случае мерзлой почвы обычно пользуется кривая времени года, которая дает максимальный сток. Влияние снежного покрова на почву выражают через объем талой воды и интенсивность снеготаяния, а не через суммарное количество накопленного снега. Проблема снеготаяния рассматривается в разделе 6.3.5.

6.3.2.2.2 Начальный базисный сток как показатель объема стока

Во влажных районах, где реки пересыхают редко, базисный сток в виде стока грунтовых вод на начало ливня часто используется как показатель начальной увлажненности бассейна. Пример такой зависимости показан на рисунке II.6.8. Расход базисного стока отражает условия увлажненности всего бассейна. Для некоторых районов необходимо строить такие зависимости для отдельных сезонов. Обычно в этом случае разрабатывается одна зависимость для лета и другая для зимы, что приводит к неизбежной проблеме оценки стока ливневых осадков, выпадающих в межсезонье. Обычным решением этой проблемы является оценка стока по каждой кривой, а затем интерполяция полученных результатов.

Использование базисного стока грунтовых вод в качестве показателя условий стока ограничивается обычно малыми бассейнами с малым временем добегания.

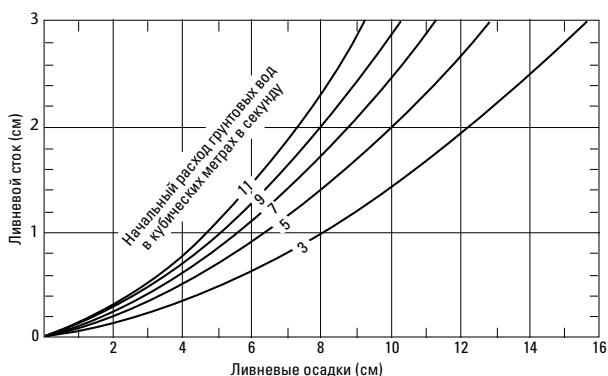


Рисунок II.6.8. Основной сток как индекс соотношения осадки–сток

На более крупных бассейнах в период сезона дождей один подъем гидрографа накладывается на предыдущий, что значительно затрудняет определение исходного расхода грунтовых вод. Обычно определяют исходный расход грунтовых вод для малых водосборов, а затем используют его для других, близко расположенных территорий, имеющих аналогичные гидрологические характеристики.

6.3.2.2.3 Методы, учитывающие влажность почвы

Дефицит влажности почвы является, вероятно, самым важным фактором, включаемым в зависимость между осадками и стоком. Пригодное для практического использования средство оценки начального дефицита влажности почвы для всей площади дало бы возможность получить очень полезную переменную для включения ее в корреляционные связи ливневых осадков с образуемым стоком. Приборы для измерения влажности в отдельных слоях почвы получили широкое практическое применение, однако большое разнообразие типов почв и условий увлажнения, существующее даже в пределах малого водосбора, ставит под сомнение значение точечных измерений почвенной влаги в зависимости между осадками и стоком.

Более перспективным подходом является использование метода площадного оценивания, позволяющего получать значения влажности почвы для всей территории. При таком подходе осадки являются приходным элементом баланса, а расходными являются сток, стекающий с изучаемой площади по речным руслам, плюс суммарное испарение с поверхности почвы и растительного покрова. Способ определения значения осадков по площади является обычной проблемой, связанной с получением их среднего значения по площади по данным точечных наблюдений. Сток с территории можно определить по данным о русловом стоке. Таким образом, проблема сводится к тому, чтобы сбалансировать сток и ливневые осадки, вызвавшие этот сток (см. раздел 6.3.2). Разность осадки минус сток представляет собой то количество воды, которое остается в бассейне и идет на пополнение запасов влаги, R_c .

Третий элемент, суммарное испарение, является наиболее сложным из-за чрезвычайной трудности его непосредственного измерения. Большинство методов оценки влажности почвы основаны на предположении, что действительное суммарное испарение находится в простой зависимости с потенциальным суммарным испарением ET_p и дефицитом влажности почвы.

Простым подходом к оценке влажности почвы является такой, когда водоудерживающая способность почвы S , определенная по почвенному профилю, принимается единой для всей площади бассейна. В этом

случае дефицит влажности почвы DU_s определяется по следующему уравнению:

$$DU_s(t+1) = \begin{cases} 0 & \text{если } DU_s(t) - R_c + ET \leq 0 \\ DU_s(t) - R_c + ET, & \text{если } 0 < DU_s(t) - R_c + ET < S \\ S & \text{если } DU_s(t) - R_c + ET \geq S, \end{cases} \quad (6.22)$$

где $DU_s(t)$ — дефицит влажности почвы в момент времени t ; $DU_s(t+1)$ — его значение через один расчетный интервал; R_c — сток, обусловленный осадками и/или снеготаянием, и ET — суммарное испарение за период времени между t и $t+1$. Дефицит влажности почвы изменяется в пределах от нуля до S .

Данный подход будет более реалистичным, если суммарное испарение умножить на отношение $(S - DU_s(t))/S$, характеризующее уменьшение действительного суммарного испарения по мере уменьшения запасов влаги в почвенном профиле.

Другой возможностью улучшения методики является разделение почвенного профиля на отдельные слои. При таком подходе принимается, что влага в верхнем слое должна истощиться прежде, чем это произойдет в нижележащем слое и, следовательно, пополнение влагой нижнего слоя ограничено поступлением в него влаги из верхнего слоя.

Применимость полученных оценок запасов почвенной влаги в зависимостях осадки–сток может быть подтверждена путем сопоставления значения суммарного стока Q с расходом, рассчитанному по соотношению:

$$Q = cQ_U + (1 - c)Q_L, \quad (6.23)$$

где c — постоянная; Q_U — сток, рассчитанный для верхнего слоя; а Q_L — сток, рассчитанный для нижнего слоя.

6.3.2.2.4 Распределение стока во времени

Чтобы рассчитать время добегаания и распластывание паводочной волны от выпадающих на поверхность водосбора осадков, необходимо провести оценки во времени поступления воды к замыкающему створу. Для этого обычно строится единичный гидрограф, который характеризует распределение во времени стекающей с водосбора воды. Единичный гидрограф основан на использовании закона неразрывности массы в следующей форме:

$$V = \int Q(t) dt, \quad (6.24)$$

где $Q(t)$ — мгновенный расход; t — время; V — объем стока. Функция $Q(t)$ определяет вид кривой, форма которой наиболее верно отражает характеристики водосбора. Для сопоставления гидрографов, полученных для разных водосборов и содействия в построении синтетических гидрографов, были разработаны детерминистические модели, которые устанавливают связь между характеристиками гидрографов и гидрологическими и метеорологическими данными. Эти модели рассматриваются ниже.

6.3.2.2.5 Единичный гидрограф

Под единичным гидрографом для водосбора понимается гидрограф стока, сформированный за счет единичной порции стока, равномерно распределенного по водосбору в течение заданного периода времени. При применении предполагается, что единичный гидрограф неизменен во времени. Далее предполагается, что в том случае, когда объемы стока отличаются от того объема, который был принят при построении единичного гидрографа, результирующие гидрографы будут пропорциональны единичному гидрографу.

6.3.2.2.6 Построение по данным речного стока

Чтобы определить объем стока, сформированного отдельным ливнем, необходимо расчленить гидрограф на отдельные составляющие. Одна из составляющих — это прямой или ливневой сток, сформированный данным ливнем. Другая важная составляющая — сток, обусловленный предыдущими поступлениями воды на водосбор. Третья важная составляющая — сток от ранее выпавших ливней, который, просочившись через почву, поступил к замыкающему створу с запозданием. Доля этой третьей составляющей известна как внутрипочвенный сток, т. е. вода, просочившаяся через почву с незначительной задержкой. Этот сток часто рассматривают как часть прямого стока. Некоторые из последних концептуальных моделей гидрографа стока обеспечивают расчет каждой из вышеуказанных составляющих в отдельности.

При таком типе анализа невозможно выделить каждую из составляющих путем расчленения гидрографа, полученного по данным наблюдений. При использовании более простых методов анализа, в которых рассматриваются только две составляющие, расчленение наблюдаемого гидрографа и оценка величины каждой составляющей оказываются вполне возможными. В приводимом ниже примере прямой сток включает в себя поверхностный и внутрипочвенный сток.

Один из простейших методов расчленения гидрографа на основные составляющие представлен на рисунке II.6.9. Линия базисного стока экстраполируется (см. участок линии АВ) до момента наступления

пика паводка по тенденции, характерной для базисного стока в период, предшествующий подъему уровня в реке. От точки В проводится прямая линия до пересечения с гидрографом в точке С через определенный отрезок времени. Продолжительность периода (сутки), ограниченного точками В и С, зависит, главным образом, от размера площади водосбора. Как правило, она составляет около $(A/2)^{0,2}$, где А — площадь водосбора в квадратных километрах.

Обычно используются несколько методов расчленения гидрографа. Однако более важным, чем сам метод, является требование о том, чтобы на практике применялась та же методика, что и при разработке метода.

Общий сток, связанный с конкретным ливнем или ливневым периодом, может быть определен при помощи следующего метода. На рисунке II.6.9 площадь гидрографа в пределах временных абсцисс А и D представляет собой ливневый сток, т. к. начальные и конечные абсциссы характеризуют одни и те же условия истощения грунтовых вод и поэтому одни и те же запасы воды в начале и конце расчетного периода.

Рисунок II.6.9 иллюстрирует необходимые этапы построения единичного гидрографа прямого стока по данным наблюдений. Эти этапы можно выполнить либо графически либо расчетным путем. Гидрограф прямого стока располагается выше линии АВС. Объем прямого стока получают путем определения площади фигуры под гидрографом. При отсутствии планиметра удобно использовать палетку. В данном гипотетическом примере объем прямого стока оказывается равным 4 320 000 м³. При площади водосбора в 200 км² этому объему будет соответствовать слой стока в 2,16 см. Для построения единичного гидрографа каждую ординату гидрографа прямого стока необходимо разделить на 2,16. Полученный таким образом гидрограф будет иметь такую же форму, которую бы имел гидрограф прямого стока для слоя стока в 1 см, т. е. единичный гидрограф.

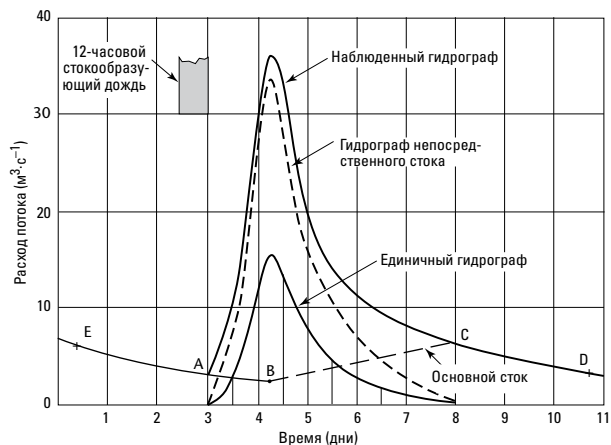


Рисунок II.6.9. Анализ гидрографа

По данным наблюдений за некоторыми водосборами трудно выделить отдельный или единичный ливень, приводящий к повышению уровня воды в реке, которое не осложняется другими явлениями. В таких случаях построение единичного гидрографа усложняется. Одним из методов построения единичного гидрографа в подобных условиях является произвольное задание исходного единичного гидрографа, реконструкция гидрографов прямого стока для нескольких ливней с использованием данных наблюдений и уточнение единичного гидрографа путем последовательных приближений. Такой метод реконструкции показан на рисунке II.6.10 и посредством уравнения:

$$q_n + Q_n U_1 + Q_{n-1} U_2 + Q_{n-2} U_3 + \dots + Q_{n-i+1} U_i + \dots + Q_1 U_n, \tag{6.25}$$

где q_n — прямой сток (расход воды) за время n ; U_i — ордината i -го единичного гидрографа; и Q_{n-i+1} — прямой сток за i -й интервал времени. Это уравнение можно также использовать в качестве регрессионной модели для расчета единичного гидрографа с использованием метода наименьших квадратов.

Для построения единичных гидрографов для водосборов площадью от 200 до 2 000 км² обычно используется расчетная единица времени шесть часов, но для большей точности расчетные интервалы могут быть сокращены. Для водосборов меньшей площади могут также потребоваться более короткие интервалы времени. Временные интервалы должны быть настолько короткими, чтобы обеспечить надежное описание формы гидрографа и дать прогноз без потери лишнего времени. Для водосборов площадью более 2 000 км² можно использовать единичные гидрографы с большей расчетной единицей времени; но, как правило, расчеты

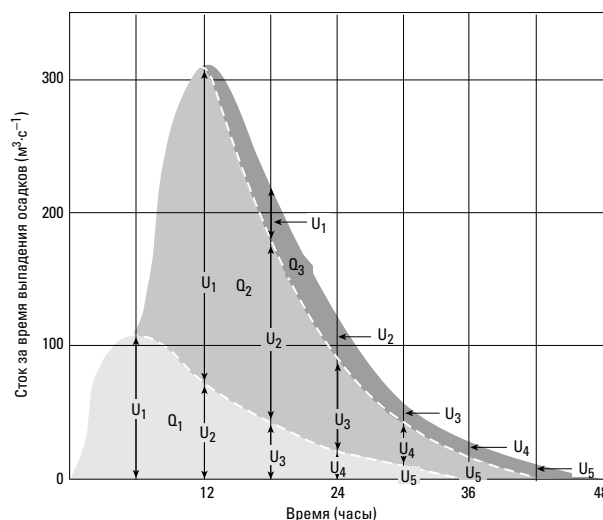


Рисунок II.6.10. Восстановление гидрографа стока за время выпадения осадков

единичных гидрографов сначала следует осуществлять для притоков, а затем объединять результаты с учетом трансформации стока русловой системой.

С точки зрения русловой гидравлики можно полагать, что существует тенденция увеличения заостренности единичных гидрографов с увеличением стока. Соответственно при практических расчетах для отдельного водосбора можно использовать семейство единичных гидрографов, когда гидрографы с более высокими пиками будут наблюдаться при больших объемах стока, а с более сглаженными пиками — при меньших объемах. Часто семейство бывает представлено лишь двумя формами гидрографов.

Искусство применения единичных гидрографов обретается на основе теоретической подготовки и практического опыта. Описание иных и более совершенных методов, которые не вошли в данный раздел, можно найти в учебниках и пособиях тех агентств, где использование единичных гидрографов является повседневной практикой.

6.3.2.2.7 Построение единичного гидрографа с помощью обобщающих методов

Часто возникает необходимость планировать сооружение или эксплуатацию объектов на реках, для которых нет данных гидрологических наблюдений. В таких случаях целесообразно построение обобщенных единичных гидрографов (Dooge, 1973). Процедура построения единичного гидрографа, разработанная Снайдером, основана на анализе большого числа бассейнов и единичных гидрографов с целью получения зависимости между формой единичного гидрографа и объективными физическими характеристиками водосбора.

Важными параметрами формы единичного гидрографа являются его заостренность, длина основания, а также время добегания, которое может иметь много толкований, однако в данном случае под ним понимается время между геометрическим центром графика осадков и пиком паводка. По методу Снайдера время добегания в часах t_p определяется по следующей формуле:

$$t_p = C_1(l_c)^n, \tag{6.26}$$

где C_1 — эмпирический коэффициент; l — длина главной реки, км; l_c — расстояние от центра тяжести водосбора до замыкающего створа, км; и n — экспонента, определяемая эмпирическим путем.

Для определения этим методом максимальной ординаты единичного гидрографа используется стандартная продолжительность дождя — t_p/C_2 , где C_2

находится эмпирически. Для дождевых осадков такой продолжительности:

$$Q_p = C_3A/t_p, \tag{6.27}$$

где Q_p — пиковый показатель стока в $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; C_3 — эмпирическая постоянная; A — площадь водосбора в км^2 ; и t_p — время добегания в часах. Основание гидрографа T_b в сутках вычисляется по формуле:

$$T_b = d + C_4t_p. \tag{6.28}$$

Постоянные d и C_4 определяются по методике, используемой при выделении базисного стока из прямого стока.

При продолжительности дождя T_R , отличной от стандартной, соответствующее время добегания t_c определяют следующим образом:

$$t_c = t_p + f(T_R), \tag{6.29}$$

где $f(T_R)$ — функция продолжительности дождя.

Коэффициенты Снайдера были получены для рек района Аппалачских гор в США. Общий метод оказался приемлемым и в других регионах, однако для иных типов рельефа, геологического строения и климатических условий коэффициенты будут другими.

Родригес-Итурб и Валдес (Rodriguez-Iturbe and Valdes, 1979) разработали физическую методологию для создания мгновенных единичных гидрографов с помощью эмпирических законов геоморфологии и характеристик климата. Они предложили геоморфологический мгновенный единичный гидрограф, известный в дальнейшем как геоморфоклиматический мгновенный единичный гидрограф. Они также вывели уравнения для определения значения пика и времени пика геоморфологического мгновенного единичного гидрографа как функции бифуркационного соотношения, соотношения длины, площади, длины потока наивысшего порядка и скорости потока.

6.3.2.2.8 Пересчет единичного гидрографа для различной продолжительности дождя

Идеальные дожди продолжительностью в единицу времени наблюдаются редко. Неравномерность осадков во времени и в пространстве обуславливает разные гидрографы, даже если суммарный объем и продолжительность ливня совершенно одинаковы. Таким образом, обобщенный единичный гидрограф определяется путем усреднения нескольких единичных гидрографов.

Один из способов обобщения единичных гидрографов заключается в сопоставлении графиков единичных гидрографов разной продолжительности. Если ординаты единичного гидрографа продолжительностью в t часов сложить с ординатами того же самого гидрографа, сдвинутого на t часов, а ординаты разделить на два, то в результате получим единичный гидрограф продолжительностью $2t$ часов. Такие преобразования очевидны.

В более широком смысле применение этой основной идеи по пересчету единичных гидрографов известно как метод суммирования или метод S-кривой. Эта интегральная кривая представляет собой гидрограф, который можно было бы получить при непрерывном приращении стока в один сантиметр за t часов. Интегральная кривая строится путем сложения ряда единичных гидрографов, каждый из которых сдвинут на T часов по отношению к предыдущему. Если основание единичного гидрографа равно T часам, то непрерывный ливень, дающий один сантиметр прямого стока за t часов, приведет к установлению постоянного значения стока к концу периода, равного T часам. Таким образом, для построения S-кривой уравненного стока потребуется T/t часов.

Построение S-кривой может быть выполнено не только графически, но и в табличной форме. Единичный гидрограф для любой продолжительности осадков t можно получить путем сдвига S-кривой на t часов и вычисления разности сдвинутых и несдвинутых S-кривых. Для получения единичного объема эти разности следует умножить на отношение продолжительности осадков исходного единичного гидрографа к искомой продолжительности единичного гидрографа.

Мгновенный единичный гидрограф представляет собой не что иное, как единичный гидрограф, единица времени которого t бесконечно мала. Построение единичного гидрографа для осадков продолжительностью t часов по мгновенному гидрографу производится с помощью S-кривой.

6.3.2.2.9 **Метод изохрон**

Метод изохрон является отражением одной из первых концепций о формировании стока с бассейна. Сток с разных участков бассейна достигает замыкающего створа в разное время. Сначала стекает вода, которая при подъеме уровня в реке поступает в нее с участков, расположенных вблизи замыкающего створа. Затем поступает вода с более удаленных участков в центре бассейна и, наконец, с самых отдаленных участков. Таким образом, площадь бассейна может быть разделена на зоны, с которых происходит последовательное поступление воды к замыкающему створу. Линии, разграничивающие эти зоны на рисунке II.6.11 (а),

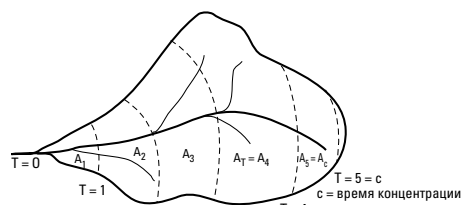
называются изохронами. Распределение межизохронных зон (как по времени добегаания, так и по площади) принимается постоянным для данного бассейна для всех гидрографов паводков.

Чтобы определить функцию распределения, необходимо сначала рассчитать или задать среднее время добегаания или среднюю скорость стекания. Изохроны наносятся на карту бассейна в соответствии со средней скоростью стока в русло или средним временем добегаания. Затем с помощью планиметра определяется площадь каждой зоны, и полученные величины наносятся на график для соответствующих значений времени добегаания (рисунок II.6.11 (б)).

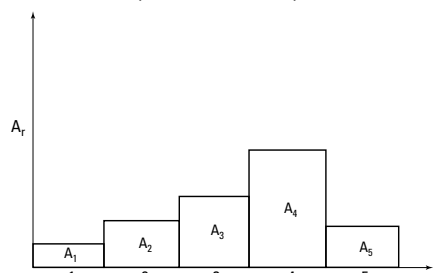
Такое пространственно-временное распределение является отражением гидрографа стока при равномерном ливне единичной продолжительности Δt , разнице во времени между изохронами. При нескольких периодах ливней, каждый из которых дает разное количество стока с разных зон, используется формула:

$$Q_t \Delta t = A_1 V_t + A_2 V_{t-1} + A_3 V_{t-2} + \dots + A_c V_{t-c+1}, \quad (6.30)$$

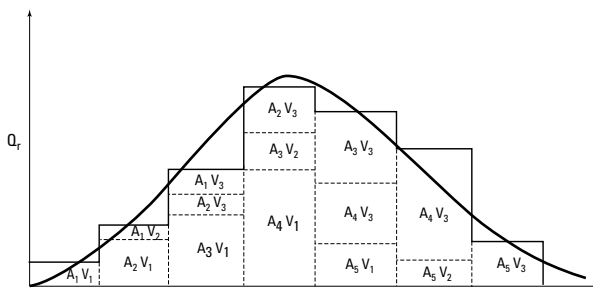
где Q_t — средний расход воды за период Δt , заканчивающийся в момент времени t ; A — ордината



а) Карта бассейна с изохронами



б) Пространственно-временное распределение



в) Итоговый гидрограф

Рисунок II.6.11. Метод изохрон

гистограммы площадь–время за это же время; V_t — зональный сток в течение этого же периода. При этом необходимо обеспечить совместимость единиц. На рисунке II.6.11 (с) приводится расчет результирующего гидрографа при трех периодах равномерного стока по бассейну.

Итоговый гидрограф отражает характеристики времени добегания водосбора. Поскольку фактический гидрограф подвержен влиянию русловой ёмкости, то гидрограф, рассчитанный по уравнению (6.30), должен быть направлен через ёмкость. Для этого можно использовать любой известный метод, описанный в литературе. В разделе 6.3.5 описываются два таких метода. Чтобы получить наиболее удачную комбинацию при моделировании наблюдаемых гидрографов, при подгонке изохрон и параметров трансформации предпочтение обычно отдают методу проб и ошибок.

Метод изохрон позволяет учесть неравномерное распределение дождевых осадков в том случае, когда число установленных в бассейне осадкомеров является достаточным для надежного описания хода дождя. Это является преимуществом по сравнению с методом единичного гидрографа, представленным ранее.

6.3.3 Моделирование подземных вод

6.3.3.1 Общие положения моделирования

Подземные воды становятся все более важным источником воды для человечества, поскольку ресурсы поверхностных вод истощаются из-за возрастающего забора вод и их загрязнения.

Поскольку подземные воды являются скрытым и удаленным объектом, их сохранение и управление дорого и с точки зрения научного подхода затруднено из-за недостаточности доказательств, знаний и понимания их местоположения, количества и характера. Следовательно, для того чтобы определить границы их распространения, объем и качество и, в свою очередь, осваивать, управлять и защищать их, необходимо создавать репрезентативные модельные сценарии для проверки их потенциального и реального объема и качества. В этом разделе кратко рассматриваются научный подход и практические методы гидрогеологического моделирования с точки зрения практического применения, главными элементами которого являются разработка, освоение, контроль и сохранение.

6.3.3.2 Разработка концептуальной модели

Для того, чтобы с достаточной точностью представить гидрологический режим, необходимо воспроизвести

посредством модели значительное число характеристик. Эти элементы модели охватывают несколько выражений в качестве предмета обсуждения (Bear, 1980, 1988).

Тип и детальность концептуальной модели будут зависеть от масштаба, количества времени и ресурсов — имеющихся данных, технической экспертизы, людских ресурсов, вычислительных средств — обеспечивающих решение поставленной задачи, а также от качества процесса принятия решения, профессиональных рисков и нормативно-правовой основы.

Концептуальное моделирование непрерывно и циклично, следовательно, применим многоуровневый подход: основной–промежуточный–детальный. Предположения, входящие в концептуальную модель, должны быть связаны с вопросами, описанными ниже.

6.3.3.3 Развитие математической модели

Главные элементы модели включают в себя следующие компоненты:

- определение геометрии поверхностей, ограничивающих область;
- уравнения, которые описывают балансы компонентов, например массы жидкости, массы химических соединений и энергии;
- уравнения потоков, которые связывают потоки компонентов с соответствующими переменными задачи;
- уравнения состояния, которые определяют поведение конкретных фаз и соответствующих химических соединений, например, зависимость плотности и вязкости от давления, температуры и концентрации раствора;
- источники и поглотители количеств компонент, обычно упоминаемые как принудительные функции.

Настройки для запуска модели включают в себя следующие положения:

- начальные условия, которые описывают известное состояние системы в некоторый начальный момент времени;
- пограничные условия, которые описывают взаимодействие рассматриваемой области с внешней окружающей средой, т. е. за пределами делимитированной зоны, через их общие границы.

Если для решения применяемой математической модели требуется использование новой численной модели со своей системой кодирования, необходимо осуществить процедуру тщательной верификации посредством проверенных ранее прикладных программ для того, чтобы определить, соответствует ли

она цели. Если это практически осуществимо, то следует использовать сравнительные сценарии с разными кодами.

Режим подземных вод контролируется геологическими и климатическими условиями и используется человеком для удовлетворения потребностей разработки водных ресурсов, в то время как экологические требования удовлетворяются посредством соблюдения остаточного баланса. Для оценки наличия, объемов и изменчивости доступных подземных вод необходимо проводить исследования и тестирования. Они основываются на широком практическом опыте различных наук о Земле, включая гидрометеорологию, гидрологию, почвоведение, геоморфологию, петрологию, геологию и гидрохимию.

Подземные воды являются частью водной циркуляционной системы Земли, известной как гидрологический цикл, при этом водоносные горизонты земной коры действуют как каналы для переноса и как резервуары для хранения воды. Вода поступает в эти горизонты с земной поверхности или из водоемов, расположенных на поверхности Земли, затем она медленно проходит различные расстояния до тех пор, пока вновь не вернется на поверхность под действием естественного стока, растений или человека. Объемы резервуаров подземных вод значительные, а скорости их течения низкие, поэтому они могут представлять собой существенные и широко распространенные источники воды. Подземные воды, поступающие в русла поверхностных водотоков, питают их, когда поверхностный сток мал или отсутствует. Кроме того, вода, выкачанная из колодцев, во многих регионах является единственным источником воды для многих аридных территорий в течение большей части года.

Вода в толще почвогрунтов движется вниз через ненасыщенную зону под действием силы тяжести, в то время как в насыщенной зоне она движется в направлении, определенном гидравлическими условиями. Главными источниками естественного питания являются осадки, сток, озера и водохранилища. Разгрузка подземных вод наблюдается, когда вода выходит из-под земли. Чаще всего естественная разгрузка осуществляется в форме потока в поверхностные водные объекты, например реки, озера и океаны, или потока на поверхность в виде ключей. Подземные воды, расположенные на незначительной от поверхности глубине, могут возвращаться прямо в атмосферу посредством испарения с почвы и транспирации растений. Выкачивание воды из колодцев составляет главную часть искусственного расхода подземных вод.

Подземные воды встречаются в проницаемых геологических образованиях, известных как водоносные слои, структура которых способствует потоку воды

в естественных условиях, при этом водоупоры, являющиеся непроницаемыми пластами, препятствуют движению воды. Подземные воды могут занимать часть горных пород или почвы, которая не занята твердыми минералами (Todd, 2005). Эти пространства называются пустотами, расселинами, порами или поровыми пространствами и характеризуются их размером, формой, неправильностью и распределением. Первичные расселины были образованы геологическими процессами, определявшими происхождение геологической формации, и находятся в осадочных и магматических горных породах. Вторичные расселины появились после того, как сформировалась порода, и представляют собой стыки, разломы и проломы. Пористость горной породы или почвы является мерой содержания расселин и выражается в процентах пустот в общем объеме массы. Если a — это пористость, то:

$$a = 100w/V, \quad (6.31)$$

где w — объем воды, необходимый для заполнения или насыщения всего пористого пространства, и V — общий объем горной породы или почвы.

Пористость может принимать значения от нуля до 50 процентов в зависимости от формы и расположения отдельных частиц, распределения по размерам и степени сжатости и сцепления.

Существует ряд моделей, которые используются для представления движения подземных вод и явления переноса. Они включают следующее:

- а) физическое представление с помощью масштабной модели, включающей среду, через которую входит жидкость, контролируемая приборами для измерения давления и напора;
- б) электрическое представление, в котором напор, поток и проводимость представлены напряжением, током и сопротивлением;
- в) математическое представление, использующее набор алгоритмов для представления главных процессов;
- г) стохастический анализ для характеристики моделирования подповерхностного стока и переноса.

На практике чаще всего в настоящее время используется гидрогеологическое моделирование, указанное в пунктах (в) и (г) выше. Что касается явления переноса, связанного с загрязнением грунтовых вод, при котором встречаются двух- и трехфазные условия потока, то использование математических моделей считается важным из-за необходимости представлять и анализировать сложные сценарии.

Движение подземных вод в их естественном состоянии подчиняется установленным гидравлическим принципам. Поток воды через водоносные слои можно

выразить с помощью закона, выведенного Дарси в 1856 г., согласно которому скорость потока через пористую среду пропорциональна снижению напора и обратно пропорциональна длине пути потока. Закон Дарси может быть выражен следующей общей формулой:

$$Q = KA \frac{dh}{dL}, \tag{6.32}$$

где Q — скорость потока; K — коэффициент проницаемости (иногда называемый гидравлической проводимостью) и dh/dL — гидравлический градиент. Это соотношение показано на рисунке II.6.12.

В соответствии с условными обозначениями этого рисунка, закон Дарси принимает следующий вид

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{L}, \tag{6.33}$$

где h (размерность: $[L]$) — пьезометрический напор:

$$h = z + \frac{p}{\rho g}, \tag{6.34}$$

где z — высота точки, в которой рассматривается пьезометрический напор над некоторым исходным уровнем; p и ρ — давление жидкости и плотность массы соответственно; и g — ускорение свободного падения.

Гидравлическую проводимость K можно представить в следующем виде:

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} = \frac{kg}{\nu}, \tag{6.35}$$

где g — ускорение свободного падения, а k (размерность: $[L^2]$) — проницаемость или истинная водопроницаемость пористой среды. Это коэффициент, который зависит только от свойств конфигурации пустого пространства.

Течение подземных вод является важным аспектом гидрогеологии и основывается на принципах движения жидкости через пористую среду. Для его понимания требуются глубокие знания в области механики жидкости, однако в рамках этого краткого обзора гидрогеологии его невозможно описать исчерпывающим образом. Вместе с тем можно резюмировать основные части потока подземных вод в соответствии с пространственными параметрами потока, его временным ходом, границами распространения и свойствами среды и жидкости.

6.3.3.4 Оперативные опции модели

При разработке модели могут быть выбраны следующие опции:

- a) размерность модели (одно-, двух- или трехмерность);
- b) стационарный или нестационарный режим;
- c) число и виды жидкостных фаз и соответствующий химический состав;
- d) возможность фазовых переходов и химический обмен между смежными фазами;
- e) режимы движения жидкости, например ламинарный или неламинарный;
- f) наличие неизотермальных условий и их влияние на жидкость или характеристики твердого состояния и на химико-биологические процессы;
- g) соответствующие переменные состояния и площади или объемы, по которым следует проводить осреднение этих переменных.

Любой сток подземных вод в природе до определенной степени является трехмерным, но сложность решения проблем, связанных с движением грунтовых вод, зависит от того, в какой мере поток является трехмерным. При этом практически невозможно анализировать проблему естественного движения, если оно не

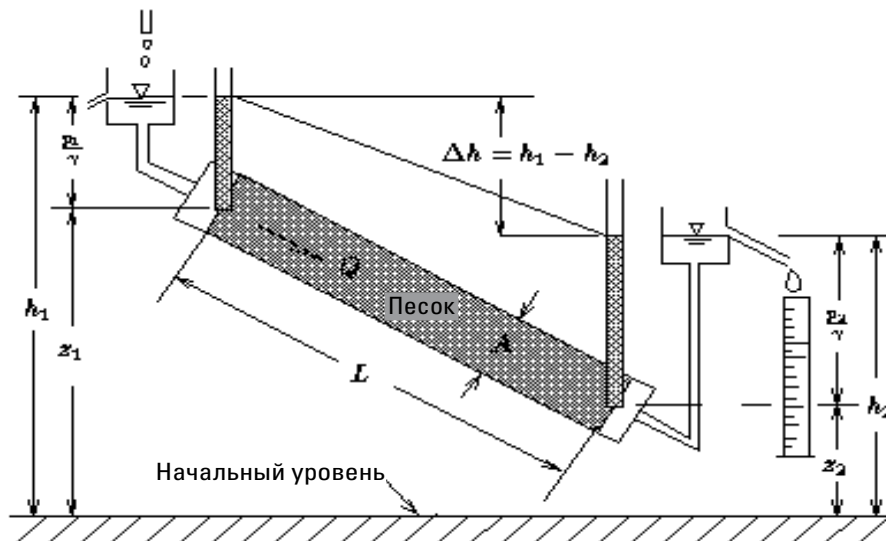


Рисунок II.6.12. Представление эксперимента Дарси

может быть выражено в терминах двумерной проблемы, предполагающей наличие симметрии. Следовательно, большинство решений основываются на предположении о том, что рассматриваемые проблемы являются двумерными или имеют особые характеристики симметрии.

Количественное оценивание стока подземных вод обычно основывается на данных о скорости, давлении, плотности, температуре и интенсивности просачивания воды через геологическую формацию. Эти водные характеристики часто являются неизвестными переменными и могут изменяться во времени и пространстве. Если неизвестные или зависимые переменные являются функциями только пространственных характеристик, поток оценивается как устойчивый; если они также являются функциями времени, поток рассматривается как неустойчивый или зависимый от времени.

Движение подземных вод в заполненных водой порах — водоносном горизонте — зависит от ограничивающих поверхностей среды, т. е. границ. Если эти границы неизменны во времени и пространстве для различных состояний потока, водоносный горизонт является закрытым. Однако, если поток обладает свободной поверхностью, которая изменяется в зависимости от состояния потока, он является открытым.

Движение подземных вод в водоносном горизонте определяется характером, особенностями и изотропией среды. Если характеристики среды в любой точке и в любом направлении от этой точки неизменны, то такая среда является изотропной; если нет, то она считается анизотропной. Среда считается гетерогенной по своему составу, если ее характер, особенности и условия изотропии или анизотропии меняются от точки к точке в этой среде, и гомогенной, если ее характер, особенности и условия изотропии или анизотропии постоянны в ней.

Еще одно разделение — напорный или безнапорный поток. Поток является напорным, если все пустоты среды полностью заполнены жидкостью на этапе главного течения и безнапорным — в обратном случае. Глубоко залегающие подземные воды всегда являются напорными, а выше зоны напорных вод в отсутствие вышележащих непроницаемых слоев находится безнапорная зона. Граница между этими двумя зонами называется поверхностью грунтовых вод или фреатической поверхностью. Верхняя зона занята частично воздухом и частично водой и называется безнапорной зоной или зоной аэрации. Она состоит из верхней области, которая называется областью почвенных вод, промежуточной области и нижней области, которая известна как капиллярная область.

В почвенной области существует дефицит влаги, кроме случаев, когда избыточная вода поступает в нее в результате длительных дождей. Область простирается от поверхности земли через основной корнеобитаемый слой; ее толщина зависит от типа почвы и растительности.

Три основные гидравлические характеристики водоносного горизонта — пористость, которая определяет объем аккумулируемой влаги, удельная водоотдача, которая определяет объем воды, отдаваемый в форме естественного стока или посредством откачки, и проницаемость, которая определяет скорость движения воды в водоносном горизонте.

Целый ряд методов моделирования движения подземных вод можно найти в различной литературе. Большая часть их — это преимущественно физические методы, основанные на строгой физике движения воды в пористой среде. Однако также используются и концептуальные методы и даже метод «черного ящика».

Математика описания движения жидкости и переноса в напорных и безнапорных пористых средах очень сложна. Существует множество физически обоснованных уравнений, построенных с учетом различных допущений и упрощений для различных конфигураций водоносного горизонта, в т. ч. для закрытых, открытых и полузакрытых горизонтов. Классический обзор физически обоснованных методов можно найти в работах Иглсона (Eagleson, 1970). См. также Мейдмента (Maidment, 1992).

Движение подземных вод описывается системой из трех нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, выражающих сохранение массы — уравнение неразрывности, уравнение сохранения количества движения и уравнение состояния. Допуская несущественное сжатие воды и пористость среды, изотермическое неустойчивое ламинарное движение воды при отсутствии выходов источников и воронок может быть описано следующими дифференциальными уравнениями в частных производных (Eagleson, 1970):

$$W + S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right), \quad (6.36)$$

где h — пьезометрический напор; K_x , K_y и K_z — коэффициенты водопроводимости (для изотропных сред $K_x = K_y = K_z = K$); W — общая характеристика для источников и воронок; и S_s — удельное содержание влаги. В случае переменного напорного потока водопроводимость и удельное содержание влаги являются функциями влажности.

Уравнение для описания процессов переноса подземными водами может быть получено с использованием уравнения (6.51). Адвективно-дисперсионное уравнение переноса используется для моделирования процессов, имеющих отношение к качеству воды, например переноса растворенных веществ как консервативных, так и химически активных.

Физически обоснованные дифференциальные уравнения в частных производных для описания движения грунтовых вод и переноса лежат в основе моделей подземных вод с распределенными параметрами, в которых решение обычно получают с помощью методов конечных разностей или конечных элементов. Обзор программного обеспечения для решения проблем подземных вод был проведен Андерсоном и др. (Anderson, 1992). Среди кодов, включенных в компонент ГОМС L20.2.04, есть конечно-разностная модель течения грунтовых вод с модульной структурой, или MODFLOW — универсальный пакет программного обеспечения, разработанный Службой геологии, геодезии и картографии США, который широко используется во всем мире в различных применениях.

Модель MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988) имитирует движение подземных вод в пористой среде в трех измерениях, а также способна моделировать поток в двух измерениях. Модульная структура была использована для программы и документации для того, чтобы сделать модель более понятной и чтобы при необходимости в нее можно было вносить изменения. Код модели состоит из серии пакетов или модулей, которые могут быть выбраны для решения конкретной задачи. Среди модулей — решающие уравнения программы; модули, отвечающие за поток, пополнение, откачку и испарение. Область применения MODFLOW включает стационарные и переходные потоки грунтовых вод; движение подземных вод в ограниченных, в имеющих выход и неограниченных водоносных слоях; и некоторые особые проблемы потока, такие как родник и разгрузка в колодец. Колодцы, реки, дренажные системы, испарение и пополнение могут быть смоделированы и представлены как зависимые от напора источники, где напор вне модели определяет пользователь. MODFLOW может быть использован при изучении взаимодействий между подземными и поверхностными водами, таких как частичная разгрузка подземных вод в реки и озера. В качестве исходных данных модель требует гидравлические параметры водоносных горизонтов, граничные условия, начальные условия и нагрузки. Входные данные представляются в виде текстовых файлов с данными, изложенными в установленном порядке и формате. Входные данные должны соответствовать указанной структуре сетки. Основным результатом реализации модели является напор в каждой точке. Кроме того, рассчитывается водный баланс, и поток

через каждую ячейку модели может быть сохранен в файле диска. MODFLOW, вероятно, наиболее широко используемая модель подземных вод в мире.

Пакет MODFLOW предназначен для использования опытными гидрогеологами. В помощь пользователю доступны полезные препроцессоры и постпроцессоры.

6.3.3.5 Планирование

Для осуществления проекта по моделированию движения подземных вод первым и весьма важным шагом является определение цели работы. В случае крупных проектов на этом этапе может потребоваться предпроектное исследование для определения необходимых условий и анализ целей проекта, а также обзор предшествующих исследований и имеющихся данных. Кроме определения целей проекта и основных задач, которые будут решаться, предпроектное исследование должно также определить основные ожидаемые результаты работы.

Планирование также включает определение типа информации, которую ожидается получить с помощью модели для принятия управленческих решений и данных, которые имеются, и тех данных, которые необходимо будет получить благодаря осуществлению программы мониторинга. Кроме того, важно определить имеющиеся ресурсы, в т. ч. экспертные знания, квалифицированный персонал, оборудование для мониторинга, полевые данные и компьютеры, которые необходимы для разработки и реализации модели в рамках бюджетных ограничений, которые могут быть установлены. Это включает способность понимания и описания протекающих процессов и данные, необходимые для проверки модели и определения численных значений ее коэффициентов. Следует также учитывать местные нормативно-правовые рамки, которые касаются данного случая, для обеспечения того, чтобы результаты моделирования были достаточно надежными, обширными и подробными, чтобы соответствовать будущим проверкам.

Хорошей практикой является создание управленческой команды, в которую должны быть привлечены соответствующие заинтересованные стороны для руководства проектом, рассмотрения промежуточных результатов, разрешения разногласий и достижения соглашений по вопросу о приемлемости каждого этапа процесса разработки модели.

После того, как определены цели проекта по моделированию, необходим поэтапный подход из-за ряда неопределенностей относительно высокой стоимости и длительности программы работ, что, как правило, имеет место при моделировании движения подземных вод. Признавая эти проблемы, Агентство по окружающей

среде Англии и Уэльса разработало руководство (Environment Agency, 2002) с изложением последовательных этапов, которые должны быть учтены в процессе моделирования подземных вод, как показано на рисунке II.6.13.

Проиллюстрированный выше подход включает систему поддержки принятия решений, которая развивается с предпроектного исследования в концептуальную модель и историческую модель, заканчиваясь прогнозной моделью, которая может быть впоследствии усовершенствована с помощью оперативных данных. Эти средства предназначены для достижения целей, оценки вариантов, получения отклика на варианты, оценки результатов, выбора предпочтительного решения и создания системы мониторинга для оценки долгосрочных результатов.

6.3.4 Модели снеготаяния

Снеготаяние, с точки зрения формирования запасов воды, идущих на инфильтрацию и образование стока, является аналогом дождевых осадков, за исключением задержки воды в снежном покрове. В некоторых районах снеготаяние является основным источником воды в водохранилищах, реках, озерах и подземных водоносных горизонтах. В горных снежных районах снеготаяние является важным компонентом стока, обеспечивая более 50 процентов общего стока. В некоторых горных бассейнах снеготаяние дает 95 процентов стока.

Обычные измерения дополнительных изменений запасов воды в снежном покрове не дают удовлетворительных результатов измерений снеготаяния, главным образом, из-за существующих погрешностей при наблюдениях и взятии проб. Есть еще две дополнительные и неизбежные причины того, почему снеготаяние необходимо рассчитывать, а не наблюдать. Одна из них связана с прогнозированием стока, когда выгоднее прогнозировать причины снеготаяния, а не просто ожидать его результатов. Вторая причина, связанная, в частности, с проектированием и разработкой, заключается в необходимости экстраполяции экстремальных величин снеготаяния на основе физических процессов. Снеготаяние является частью ряда гидрологических моделей, что отражено в коротком обзоре компонентов ГОМС в разделе 6.1.6.

В принципе концептуальная модель талого стока — это объединение стандартной модели расчета аккумуляции и абляции снега с моделью дождевого стока. Такая объединенная модель может использоваться для составления прогнозов в течение всего года в любых климатических условиях. Модели талого стока были также разработаны специально для расчета стока в период весеннего снеготаяния. Во всех случаях таяние снежного покрова связано с энергетическим

балансом. Закон сохранения энергии определяет, что изменение температуры снега зависит от баланса потоков поступающей и уходящей энергии. Сохранение массы в снежном покрове может быть описано следующим простым уравнением неразрывности:

$$I - O = \frac{dS}{dt} . \quad (6.37)$$

Исходными являются данные об осадках, конденсации и наличии ледяной корки, в то время как на выходе будут сублимация и сток; все характеристики выражены в миллиметрах слоя воды. Изменения массы в снежном покрове могут также происходить за счет сдувания снега, сублимации и аккумуляции (Pomeroy and Brun, 2001); на выпадение снега может влиять перехват снега кронами деревьев, который может вызывать существенные потери в массе снега. Часть перехваченного снега может сдуваться с деревьев и в конечном счете оказывается на земле, но большая часть сублимирует и будет потеряна для снежного покрова (более подробную информацию о перехвате снега кронами деревьев см. у Hedstrom and Pomeroy, 1998).

Из-за всех этих сложностей были разработаны концептуальные методы для оценки физических особенностей снежного покрова и его последующего таяния в масштабах бассейна. Они включают кривые истощения снежного покрова и модели таяния, использующие температурные индексы. И те, и другие используются во многих оперативных гидрологических системах моделирования для описания и прогнозирования гидрологического отклика на покрытых снегом водосборах.

6.3.4.1 Индексные методы оценивания стока с бассейна

Многие модели для прогнозирования талого стока (как средне-, так и долгосрочные) основаны на статистических индексных методах. Имеющиеся данные об осадках и снежном покрове в горах не позволяют, как правило, определять снегозапасы и могут лишь индексировать эту величину. По этой причине взаимосвязи между сезонным стоком и индексом снегонакопления носят статистический характер. Будучи пригодными для прогностических целей, они в большинстве случаев не могут использоваться для водно-балансового анализа.

Оправдываемость долгосрочного прогноза зависит главным образом от того, насколько точно индекс снегонакопления отражает фактические условия. Существуют, по крайней мере, пять дополнительных факторов, которые могут оказывать влияние на сток и, следовательно, на корреляционную связь между стоком и индексом снегонакопления:

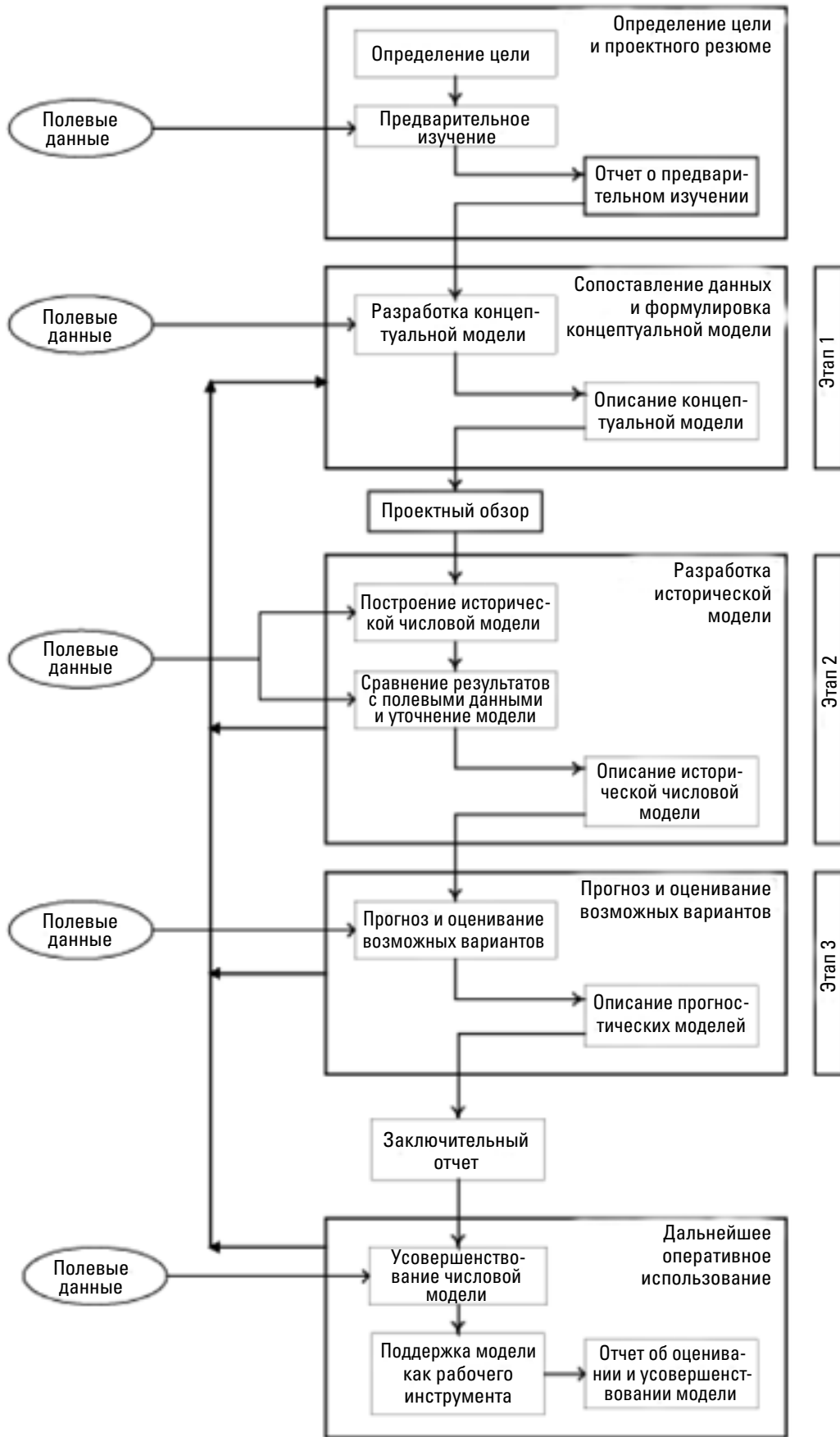


Рисунок II.6.13. Процесс моделирования грунтовых вод (Агентство по окружающей среде, 2002)

- a) запасы подземных вод за предшествующий период;
- b) количество осадков, выпавших между последней снегомерной съемкой и датой выпуска прогноза;
- c) количество осадков, выпавших за период весеннего снеготаяния или за период, для которого готовится прогноз;
- d) количество сублимированного снега за период между последней снегомерной съемкой и датой выпуска прогноза;
- e) количество сублимированного снега за период весеннего снеготаяния или за период, для которого выпускается прогноз.

В тех речных бассейнах, где базисный сток из водоносных горизонтов составляет существенную часть суммарного стока и где он значительно меняется от года к году, надежность корреляционной связи может быть увеличена за счет учета запасов подземных вод.

Осадки можно учитывать двумя способами:

- a) путем сложения индекса осадков с индексом снегонакопления и использования суммы этих индексов в качестве одной переменной;
- b) используя индекс осадков в качестве дополнительной переменной.

Осадки, выпавшие после начала снеготаяния, должны включаться в расчетные уравнения по мере поступления данных о них. Это гарантирует то, что влияние этих осадков будет учтено при выведении статистических соотношений для прогноза талого стока.

Если позволяют финансовые бюджеты, снегомерные съемки в горах необходимо проводить несколько раз в течение зимы, чтобы вывести тренды снегонакопления. Последняя снегомерная съемка обычно проводится в конце периода снегонакопления, как раз перед началом весеннего снеготаяния. Данные снегомерки в конце периода снегонакопления используются для расчета индекса снегонакопления.

Снегомерные маршруты на различных высотах используются с целью получения данных для установления взаимосвязи между запасом воды в снежном покрове и высотой $w = f(z)$. Каждый год устанавливается новая зависимость. Если данных наблюдений недостаточно для построения графиков $w = f(z)$, можно применить множественную корреляцию между стоком и запасом воды в снежном покрове, используя данные по каждой точке наблюдений. Данные снегомерных маршрутов могут, кроме того, использоваться в качестве входных данных в статистических моделях для прогнозирования стока.

В большинстве случаев наиболее надежный индекс стокообразующих запасов воды в снеге для горных территорий можно получить при совместном

использовании данных осадкомеров и данных снегомерок. Это может быть осуществлено с помощью статистических методов.

6.3.4.2 Концептуальные модели талого стока

Сток с бассейна может быть оценен с помощью ряда возможных алгоритмов, представляющих физику снеготаяния. Чаще всего снеготаяние описывается как процесс выпадения осадков и процесс инфильтрации талой воды в почву с использованием ряда возможных алгоритмов инфильтрации. Модели расчета талого стока обычно включают модель снеготаяния и функцию преобразования. Модель снеготаяния рассчитывает объем воды, которая доступна для стока, а функция преобразования — это алгоритм, который пересчитывает воду на поверхности земли в сток на выходе из бассейна (Donald and others, 1995). Модель снеготаяния и модель трансформации могут быть со сосредоточенными и распределенными параметрами. Модели со сосредоточенными параметрами используют один набор значений параметров для определения физических и гидрологических характеристик водосбора. Модели с распределенными параметрами учитывают пространственную изменчивость посредством деления водосбора на частные водосборы и вычисления талого стока отдельно для каждого такого частного водосбора, используя для каждого соответствующий набор параметров. Модели снеготаяния обычно включают представление снежного покрова, который может быть как простым однослойным (см., к примеру, Anderson, 1973), так и многослойным абстрактным, как это иллюстрируют Брун и др. (Brun and others, 1992). Представление снежного покрова усложняется сроками стока снеготаяния из-за его влагоудерживающей способности.

Во многих оперативных моделях талого стока используются различные типы температурного индекса (метод градусо-дня), с помощью которого определяется период, в течение которого происходит снеготаяние, и объемы стаявшего снега за определенные периоды времени. В моделях аккумуляции и абляции снежного покрова накопление снега определяется по температуре воздуха и осадкам и, кроме того, температура воздуха служит единственным индексом теплообмена на границе раздела снег-воздух. Последний аспект как правило моделируется с помощью метода градусо-дней, в котором температура воздуха является индексом поступления воды из снежного покрова. В методе градусо-дня в явном виде не учитываются те процессы, которые регулируют водоотдачу из снежного покрова, т. е. замерзание растаявшей воды при недостатке тепла и различные фазы перехода воды в жидкое состояние, в отличие от процесса таяния снега. На рисунке II.6.14 приводится блок-схема модели аккумуляции и абляции снежного покрова, разработанная Андерсоном

(Anderson, 1973). Фактические измерения характеристик снежного покрова по данным снегосъемок или точечных наблюдений могут использоваться как дополнительный источник информации для улучшения прогнозов сезонного стока, полученных по концептуальным моделям, в которых в качестве входных данных используются только температура воздуха и осадки (Todini and others, 1978).

6.3.4.3 Расширенное моделирование стока

Концептуальные модели могут лишь имитировать процесс формирования талого стока за период, для которого имеются входные данные. Прогнозы же на будущее можно составить, используя прогнозируемые величины осадков и температуры воздуха, полученные

на основе статистического и стохастического анализов или на основе расширенного прогнозирования с использованием численных моделей погоды. Ход стока за сезон не может надежно прогнозироваться без учета влияния будущих погодных условий.

В прогнозах стока, основанных на методе индексов или статистических методах, будущие условия погоды могут быть оценены с использованием индексов за оставшийся сезон на основе данных наблюдений за осадками и температурой прошлых лет. При использовании концептуальных моделей генерируются последовательности величин стока для условий каждого года на основании климатических данных за многие годы, обычно за 20 лет и более. На основании этих последовательностей могут быть построены кривые распределения вероятностей для различных характерных периодов времени в будущем и различных расчетных гидрологических характеристик, например максимального расхода, объема стока и модуля стока (Twedt and others, 1977). Это предполагает, что полученные исторические последовательности являются репрезентативными для тех условий, которые можно ожидать в будущем.

6.3.4.4 Входные данные

Входными данными, используемыми в физически обоснованных концептуальных моделях или концептуальных моделях индексного типа, могут быть измеренные осадки и/или данные измерений запасов воды в снежном покрове. При использовании физически обоснованных концептуальных моделей необходимо вводить поправки на систематические погрешности (см. том I, раздел 3.3.6), возникающие при измерениях осадков, для того чтобы входные данные, насколько это возможно, адекватно характеризовали средние величины осадков и/или снежный покров. В горных районах, где характеристики снежного покрова сильно зависят от высоты, данные наблюдений на метеорологических станциях часто подвержены влиянию местных факторов, включая ветер, уклоны и экспозицию склонов, и должны корректироваться с целью лучшего представления ими средних метеорологических условий, если они используются для моделирования условий формирования снежного покрова. На практике измерения снежного покрова и осадков дополняют друг друга.

Пространственное распределение снежного покрова часто описывается с помощью кривых истощения снежного покрова, которые суммируют процентное покрытие поверхности снегом по мере увеличения средней глубины. Отношения кривых истощения снежного покрова для целых бассейнов в настоящее время используются в гидрологических моделях с сосредоточенными параметрами, таких как Система

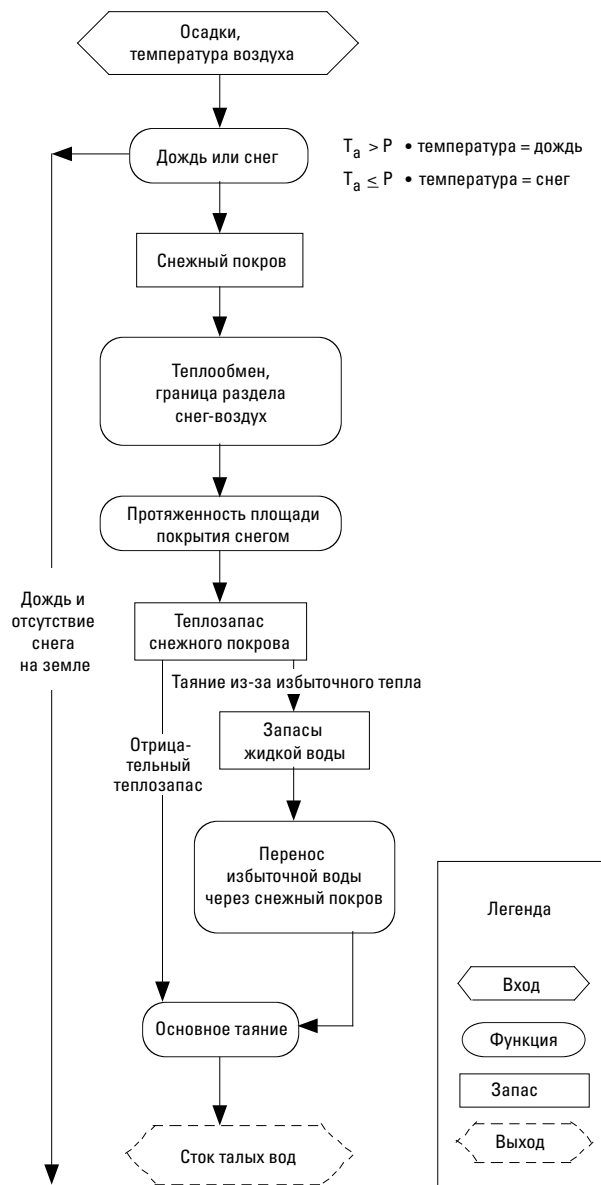


Рисунок II.6.14. Диаграмма моделирования стока при аккумуляции и таянии снега

прогнозирования режима рек Национальной службы погоды США или NWSRFS (Anderson, 1973), для описания распределения снежного покрова по мере его таяния. Эти отношения сложно получить и они требуют калибровки для каждого конкретного бассейна. Самое простое представление дает унифицированный снежный покров, имеющий постоянную высоту и полностью покрывающий всю площадь. Знание площади покрытия снегом внутри и между ландшафтными объектами необходимо для надежной оценки общего количества воды, содержащегося в снежном покрове водосбора. Площадь распределения снежного покрова может быть обобщена в форме кривой распределения площадей. Кривая распределения площадей суммирует состояние снежного покрова на данный момент времени в пределах бассейна. Интенсивные программы отбора проб необходимы для разработки баз данных для количественной оценки распределения снега в форме кривых распределения площадей.

Так как это непрактично разрабатывать физические модели распределения снежного покрова, разумно развивать статистические или эмпирические соотношения распределения снега, основанные на растительном покрове и физико-географических аспектах. Это достигается путем использования кривых истощения снежного покрова. Ранго и его коллеги предлагают кривую истощения, где процент заснеженной территории находится на оси y , а время на оси x , обеспечивая концептуально обоснованный подход к пониманию процесса таяния снега в бассейне (Rango and others, 1983).

6.3.4.5 Теория снеготаяния в точке

Рациональный подход к расчету интенсивности снеготаяния основан на тепловом балансе, который учитывает основные формы теплообмена. Тепло передается снегу путем поглощения прямой солнечной радиации, длинноволновой радиации, конвективного теплообмена с атмосферой, в виде скрытой теплоты парообразования при конденсации из воздуха; сравнительно небольшое тепло поступает вместе с дождевыми осадками и ничтожно малое количество тепла поступает от подстилающего грунта.

Уравнение энергетического баланса может быть использовано для определения количества тепла, необходимого для снеготаяния Q_m , которое может быть напрямую преобразовано в величину снеготаяния на единицу объема снега:

$$Q_m = Q_n + Q_h + Q_e + Q_g + Q_a - dS_i/dt, \quad (6.38)$$

где потоками энергии (на единицу площади) являются соответственно: Q_n — длинноволновая радиация; Q_h — перенос вследствие разницы температур между

поверхностью и атмосферой; Q_e — скрытый энергопоток в результате изменения водяного пара (выброс тепла при конденсации или его высвобождении при сублимации или испарении); Q_g — поток тепла от подстилающей поверхности; Q_a — адвекция тепла (дождь); и S_i — запас тепла в снеге.

Обычно тающий снежный покров содержит жидкой воды от 2 до 5 процентов по весу, однако в некоторых случаях в течение коротких промежутков времени, когда интенсивность снеготаяния превышает интенсивность водоотдачи, содержание воды может достигать до 10 процентов. Таким образом, в течение коротких периодов времени общее количество воды в снежном покрове может несколько превысить то количество воды, которое фактически сформировалось в процессе снеготаяния при данных метеорологических условиях. С практической точки зрения эта доля воды за счет растаявшего ранее снега косвенно входит в эмпирические константы, которые содержат в этой связи значительные неопределенности.

Величина поглощенной солнечной радиации меняется в зависимости от широты, сезона, времени суток, атмосферных условий, залесенности, уклона, ориентации поверхности и отражательной способности снега. Влияние широты, сезона, времени суток и атмосферных условий учитывается при наблюдениях за солнечной радиацией, данные которых обычно интерполируются из-за редкой сети таких станций. Это влияние можно также рассчитать за заданные сутки с помощью формул или графиков, выражающих солнечную радиацию как функцию облачности, времени года и широты.

Значительное влияние на передачу солнечной радиации снегу оказывает лесной покров; на экспериментальных бассейнах это влияние было выражено в виде эмпирического коэффициента, который связывает коэффициент пропускания радиации с густотой полога леса. Как правило, направление, крутизна склона и лесной покров представлены постоянными коэффициентами, полученными эмпирически для данного водосбора.

Отражающая способность поверхности снежного покрова колеблется в пределах от 90 процентов для свежеснеженного снега и до почти 40 процентов для слежавшегося снежного покрова, состоящего из крупных зерен и покрытого, как правило, к концу сезона тонким темным слоем нанесенной ветром органической или минеральной пыли. В конце весны в средних широтах на открытых местах снежный покров с низкой отражательной способностью поглощает обычно такое количество солнечной радиации, которого достаточно для образования 50 мм талой воды в сутки.

Длинноволновый радиационный обмен представляет собой разницу между восходящей радиацией, излучаемой поверхностью снежного покрова, и нисходящим излучением облаков, деревьев и атмосферы. При низкой сплошной облачности или наличии густого лесного покрова с температурой воздуха выше 0 °С такой обмен способствует поступлению дополнительного тепла к снежному покрову. Длинноволновая радиация из атмосферы при отсутствии облачности и леса является, главным образом, функцией температуры воздуха и почти всегда меньше излучения снега. Баланс длинноволновой радиации обычно колеблется в пределах от прироста тепла, эквивалентного слою талой воды в 20 мм в сутки, до потери тепла, эквивалентной слою замерзшей воды в 20 мм в в сутки.

При конвективном обмене тепла основными факторами являются температурный градиент в слое воздуха непосредственно над снегом и интенсивность турбулентного перемешивания, выраженная через горизонтальную скорость ветра.

При выделении тепла за счет конденсации основными факторами являются градиент упругости водяного пара и интенсивность турбулентного перемешивания, которая может быть выражена через скорость ветра. Результирующий обмен теплом в процессе турбулентного обмена может меняться от прироста тепла, эквивалентного слою талой воды более чем 100 мм в сутки, до потерь тепла, соответствующих слою замерзшей воды в 2–3 мм. Причина того, что потенциальный прирост тепла намного превышает его потенциальные потери, заключается в том, что градиенты температуры и упругости водяного пара при увеличении тепла могут быть очень высокими при температуре снега, ограниченной 0 °С, в то время как при очень низких температурах воздуха и упругостях водяного пара, сопровождающих потерю тепла, температура поверхности снега соответственно понижается, что вызывает уменьшение градиентов. Поступление тепла в результате теплового дождя можно рассчитать по скрытой теплоте плавления льда ($80 \text{ кал}\cdot\text{г}^{-1}$), который включает снег, и по температуре дождя, за которую обычно можно принять температуру воздуха по смоченному термометру. Расчеты показывают, что, для того чтобы получить 25 мм слоя талого снега в сутки, нужен очень сильный ливень — по крайней мере 120 мм дождя при температуре воздуха 16 °С.

Интенсивность поступления тепла из почвы к только что выпавшему снегу может быть очень высокой лишь в течение короткого промежутка времени. Однако при обычном установившемся градиенте температуры в почве после образования устойчивого снежного покрова приток тепла эквивалентен стаиванию не более 1 мм снега в сутки.

Указанные выше интенсивности снеготаяния при разных видах теплообмена неаддитивные. Например, условия максимального турбулентного обмена возникают при дождливой погоде и не могут совпадать с максимальной солнечной радиацией. В литературе приводится большое число различных уравнений, которые отражают режимы теплообмена через подающиеся наблюдениям элементы. Больше информации смотрите в публикации WMO-No. 749, Operational Hydrology Report No. 35 — *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture* (Измерения снежного покрова и оценивание осадков и почвенной влаги по территории) (WMO, 1992) и WMO-No. 646, Operational Hydrology Report No. 23 (WMO, 1986) — *Intercomparison of Models of Snowmelt Runoff* (Взаимосравнение моделей талого стока).

Интегрирование рациональной функции снеготаяния по значительной разнородной площади водосбора является очень трудной задачей и практически бесполезным делом при отсутствии соответствующего оборудования. Измерение количества талой воды или интенсивности снеготаяния приводит к необходимости учета водоотдачи в дополнение к учету тепла. При отсутствии дождя относительно важную роль приобретает радиационный обмен и, следовательно, влияние хотя и редко измеряемой отражательной способности снега, а также густоты полога леса. Во время сильных ливней интенсивность и объем снеготаяния могут оказаться сопоставимыми с погрешностью определения количества и интенсивности ливня. Во время ливней, сопровождающихся значительным турбулентным перемешиванием и низкой облачностью, коротковолновая солнечная радиация сравнительно невелика, и основными источниками тепла поэтому являются длинноволновая радиация, конвекция и конденсация. Из-за трудности выделения доли ливневых осадков при снеготаянии, вопрос о снеготаянии во время ливней остается в значительной степени теоретическим при крайне малой эмпирической оценке (US Army Corps of Engineers, 1960). Суточные значения солнечной радиации на данной широте и в данное время года зависят от местной облачности, наблюдения за которой, в свою очередь, достаточно субъективны и редко увязываются со способностью атмосферы пропускать радиацию. Кроме того, возникает проблема определения действующей или содействующей площади снеготаяния.

Такая действующая или содействующая площадь может быть определена как территория, на которой происходит снеготаяние или на которой талая вода достигает почвы. Эта площадь, так или иначе определенная, ежедневно меняется. Если суточный цикл включает ночное замерзание, необходимо в определенной

степени учитывать расходуемые на это тепло и влагу. В начале периода снеготаяния некоторое количество тепла необходимо, чтобы повысить температуру снега до 0 °С и дать возможность растаять такому количеству снега, которое соответствует водоудерживающей способности снежного покрова. Это количество тепла относительно мало по сравнению с тем, которое необходимо для таяния снежного покрова.

Наиболее широко распространенный метод расчета снеготаяния по всему бассейну — использование коэффициентов градусо-дня. Обычно имеются данные о температуре, и изменения температуры над водосборной площадью, как правило, могут быть определены для получения и использования функций градусо-дня. Есть два соображения в пользу применения метода градусо-дня. Во-первых, ход температуры воздуха у поверхности снега отражает в основном физическую сущность тех же самых процессов теплообмена, которые приводят к таянию снега. Во-вторых, каждый элемент теплообмена связан в той или иной степени с температурой воздуха, за исключением случаев, когда имеют место аномальные скорости ветра. Например, минимальная суточная температура воздуха хорошо коррелирует с температурой точки росы, которая определяет упругость давления водяного пара при таянии, вызванном конденсацией. Максимальная суточная температура или температурный диапазон является показателем солнечной радиации. Для ее обычного диапазона длинноволновую радиацию можно выразить как линейную функцию температуры воздуха.

Предпринимались попытки придать максимальной и минимальной суточной температуре воздуха разные веса и использовать вместо 0 °С другие основы для подсчета градусо-дней. Известны также попытки разделить сутки на более короткие единицы времени и использовать градусо-часы. Однако суточный цикл теплообмена и снеготаяния делает сутки логической и удобной единицей для определения снеготаяния, а 0 °С остается общепринятой основой градусо-дня, под которой понимается среднее значение суточной максимальной и минимальной температуры воздуха. В таблице II.6.3 приведены усредненные коэффициенты снеготаяния для нескольких горных регионов в средних широтах Северной Америки, выраженные в миллиметрах слоя талой воды, и для средне-суточной максимальной и минимальной температуры воздуха, выше базового значения 0 °С. Конкретные значения могут существенно отличаться от этих усредненных величин.

Аналогичные значения коэффициентов таяния приведены в таблице II.6.4 для равнинных районов умеренных широт бывшего Союза Советских Социалистических Республик.

Таблица II.6.3. Факторы градусо-дней (мм °С⁻¹) для гористых областей в Северной Америке

Месяц	Умеренно засаженный деревьями	Частично засаженный деревьями	Незасаженный деревьями
Апрель	2	3	4
Май	3	4	6
Июнь	4	6	7

Таблица II.6.4. Факторы градусо-дней для равнинных районов на территории бывшего Союза Советских Социалистических Республик

Зона	Факторы градусо-дней (мм °С ⁻¹)
Незасаженные деревьями области	5
Редкая хвойная и средняя плотность лиственных насаждений	3–4
Средняя плотность хвойного леса и плотность смешанного леса	1,7–1,8
Хвойный лес большой плотности	1,4–1,5

При наличии неглубокого снежного покрова количество талой воды, проходящей через снежный покров, и продолжительность ее прохождения не имеют существенного значения по сравнению с количеством и продолжительностью прохождения талых вод в почве и теми неопределенностями, которые имеют место в отношении установления самого количества талой воды. Время, требующееся для просачивания талой воды сквозь снег, составляет примерно час плюс еще по одному часу на каждые 50 см высоты снега.

Пространственные изменения в интенсивности снеготаяния, а также в распределении и сокращении размеров площадей, покрытых снежным покровом в период снеготаяния, связаны с некоторыми постоянными характеристиками водосбора, такими как рельеф и распределение растительного покрова. Соответственно интенсивность таяния снега на водосборе отражает последовательные изменения действующей площади снежного покрова и условий залегания снежного покрова в период снеготаяния. Эти изменения влияют на форму эмпирических S-образных кривых подобно тем, которые приведены на рисунке II.6.15. Вследствие неравномерного распределения снега и влияния местных факторов на интенсивность его таяния, некоторая часть снега начинает таять раньше по сравнению с остальным снежным покровом. Таким образом, средняя интенсивность таяния на единице площади, довольно низкая в самом начале периода снеготаяния, увеличивается по мере увеличения действующей площади. К концу периода таяния крутизна

кривых на рисунке II.6.15 становится меньше, так как уменьшается и площадь снеготаяния. Наиболее крутые участки кривых соответствуют периоду, когда снеготаяние происходит на большей части площади. Пропорциональность между интенсивностью снеготаяния и исходным количеством снега имеет место, главным образом, потому что с увеличением количества снега увеличивается площадь, охваченная снеготаянием. Наиболее крутые отрезки кривых на рисунке II.6.15 имеют наклон, который соответствует данным таблиц II.6.3 и II.6.4.

Потери на испарение со снега ничтожно малы за короткие периоды снеготаяния, и их может вполне уравновесить конденсация на поверхности снега. Уравнения для расчета конденсации на снежном покрове могут быть использованы для оценки испарения со снега. Измерение испарения с поверхности снега или льда является трудной задачей и по своей точности близко к точности расчета испарения. Как правило, принимается, что в зимние периоды испарение с типичной поверхности снега происходит в пределах от 0 до 20 мм в месяц. Во время периодов таяния снега преобладает конденсация, интенсивность которой колеблется от нуля до примерно 10 мм конденсата в сутки.

В горных районах, где накапливается большое количество снега, где сезон таяния может длиться несколько месяцев и где условия таяния существенно меняются в широких пределах высоты, кривые достоверности подобно тем, что изображены на рисунке II.6.15, имеют ограниченную надежность. Испарение может быть весьма значительным в течение длительных теплых периодов. Во время сезона снеготаяния применяются последовательные авиационные и другие виды съемок

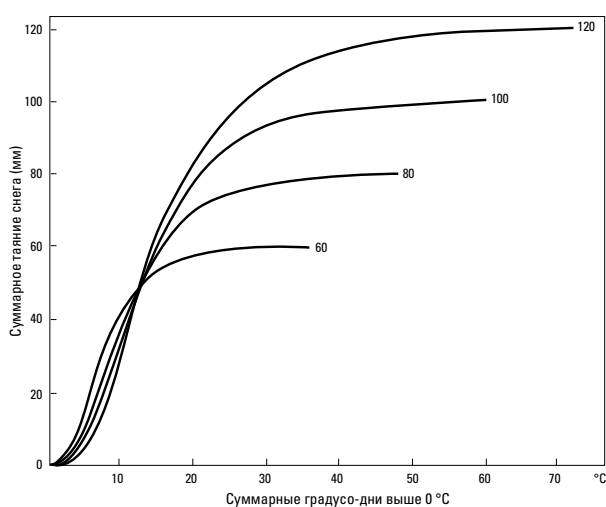


Рисунок II.6.15. Типовые отношения градусо-дней и снеготаяния для водосбора при различных значениях начального водного эквивалента

для определения изменений площади, покрытой снегом, и данные метеорологических наблюдений интерпретируются, с тем чтобы установить изменения интенсивности снеготаяния с высотой. Объем снеготаяния определяется по высотным зонам. Кроме того, при наличии глубокого снежного покрова в горах больше внимания необходимо уделять задержанию талых вод в снеге.

При необычно высокой скорости ветра или влажности воздуха следует использовать более высокие коэффициенты стаивания, чем их средние значения.

6.3.4.6 Расчет интенсивности водоотдачи из снега

Чтобы определить суммарный талый сток с равнинных водосборов, можно использовать водобалансовые исследования. На их основе суммарный талый сток может быть рассчитан в начале периода снеготаяния. Однако для расчета гидрографа часто требуются значения суточной водоотдачи из снега. Для определения этих величин необходимо учитывать следующие основные факторы:

- a) приток тепла к снежному покрову;
- b) водоудерживающую способность снега;
- c) площадь, покрытую снегом;
- d) водоудерживающую способность бассейна.

6.3.4.7 Вероятные максимальные осадки и снеготаяние

В очень крупных бассейнах, расположенных в высоких широтах, основной причиной возможного максимального паводка может быть снеготаяние, а не дождевые осадки. В этом случае объем и временное распределение паводкового стока определяются на основе расчета снеготаяния по данным о максимальных значениях температуры воздуха, скорости ветра, точке росы и солнечной радиации методом, аналогичным максимизации ливневых осадков.

В более низких широтах дождевые осадки являются, как правило, основным источником возможных максимальных паводков, а снеготаяние дает лишь некоторое дополнительное приращение на гидрографе максимального стока. К максимизированному слою осадков прибавляется слой талой воды, сопоставимый с оценочными метеорологическими условиями, сопутствующими ливню.

Для некоторых бассейнов только детальный анализ позволяет установить, является ли вероятный максимальный паводок результатом ливней в холодный сезон в сочетании со снеготаянием или же результатом

летних ливней, которые могут быть более интенсивными, но которые, как предполагается, не могут совпадать со снеготаянием.

6.3.4.7.1 **Максимально возможное снегонакопление**

Вклад снеготаяния в формирование максимального возможного паводка будет зависеть от максимальной интенсивности снеготаяния и запаса воды в снеге на момент начала снеготаяния. Запас воды в снеге представляет собой слой воды, образовавшейся в результате снеготаяния, и зависит он от плотности снега и высоты снежного покрова. Для расчета максимально возможного скопления снега использовались различные методы, однако наибольшее распространение получили следующие:

- а) метод частичного сезона: суммируются максимальные наблюдаемые значения снегозапасов за каждый месяц или за двухнедельный период в соответствии с частотой наблюдений, независимо от года проведения наблюдений, с целью получения одного «искусственного» года с очень большим снегопадом. Этот метод может применяться для расчетов и за более короткие интервалы времени, например за неделю или четырехдневный период, если имеются соответствующие данные наблюдений;
- б) максимизация слоя выпавшего снега: отношение максимального содержания влаги в атмосфере на рассматриваемой площади за то время года, когда имеет место снегопад, к фактическому содержанию влаги в выпавшем снеге. Наблюдаемое количество снега за снегопад умножается на это отношение для получения максимизированного количества осадков для данного снегопада. Максимизация содержания влаги должна быть ограничена значением, результатом которого будет получение объема снега, а не дождя;
- в) статистические методы: производится частотный анализ данных об осадках и высоте снежного покрова, чтобы определить их значения для разных периодов повторяемости. Анализируются три типа данных: слой осадков, измеренный на станции; высота снежного покрова в бассейне и запас воды в снеге на поверхности земли.

6.3.4.7.2 **Расчеты снеготаяния**

В силу сложной пространственно-временной изменчивости снеготаяния на большинстве водосборов из-за различий в уклонах, экспозиции, залесенности, а также в высоте снежного покрова, метод градусодней часто используется для практической оценки снеготаяния на водосборе. Максимальные значения градусо-дня можно вычислить по данным измерения температуры воздуха в рассматриваемом бассейне

или на прилегающей территории и использовать их для оценки максимально возможных снегозапасов, что необходимо для расчета максимально возможного стока половодья.

При оценке возможных максимальных условий температура воздуха и скорость ветра приводятся в соответствии с предполагаемыми синоптическими условиями, при которых формируются максимально возможные осадки. Предполагается также, что существует оптимальный снежный покров. В такой ситуации термин «оптимальный» означает, что:

- а) в снежном покрове имеется только такой запас воды, чтобы снежный покров растаял полностью в течение данного ливня;
- б) снежный покров уже начал таять и содержит максимальное количество жидкой воды;
- в) запасы воды в снежном покрове распределены таким образом, что их максимум соответствует зонам максимального снеготаяния, что отличается от обычной ситуации увеличения запаса воды в снеге с увеличением высоты местности.

6.3.4.8 **Сток при коротких периодах снеготаяния**

В равнинных районах, где приращение стока сравнительно мало, а период снеготаяния короткий, сток может быть оценен путем использования снеготаяния, рассчитанного с помощью описанных выше отношений «осадки–сток» (см. раздел 6.3.2). Может оказаться необходимым использовать связь, которая соответствует высокому проценту стока, потому что снежный покров или холодная погода сдерживают потери на суммарное испарение в период, предшествующий снеготаянию. На горных водосборах, где преобладает высокий снежный покров, а сезон таяния снега продолжается несколько месяцев, нет необходимости применять обязательно те методы, которые обычно используются для расчета стока, вызванного краткосрочными дождевыми осадками. Вода, образовавшаяся от снеготаяния в течение суток, обычно формирует сток в течение длительного периода, на который наслаиваются порции прироста воды от снеготаяния за многие другие дни. Кроме того, при продолжительном периоде снеготаяния большое значение приобретают потери на суммарное испарение, которыми можно пренебречь при непродолжительных дождевых осадках. Одним из путей оценки стока по данным о суточных значениях снеготаяния является в первую очередь расчет сезонного объема стока с последующим распределением этого объема в соответствии с наблюдаемыми или вычисленными для данной территории суточными значениями интенсивности снеготаяния (разделы 6.3.4.6 и 6.3.4.7), характеристиками водных запасов бассейна, способствующей стоку площади, а также сезонным суммарным испарением. Бассейновые

запасы и добегание воды можно рассчитать с помощью кривых добегания, аналогичных тем, которые используются для систем водохранилищ с константами, определенными эмпирически по историческим данным бассейна. Если же водосбор настолько мал, что суточные приращения снеготаяния не отражаются на объеме стока, следует прибегнуть к шестичасовым интервалам времени или же при построении кривых добегания следует использовать типовое суточное распределение снеготаяния.

6.3.4.9 Анализ талого стока с использованием дистанционного зондирования

Для определения талого стока используют два отдельных подхода: эмпирический метод и детерминистическое моделирование. Выбор метода зависит от имеющихся данных для расчета количества снега и необходимой детальности результатов. Чтобы точно рассчитать талый сток, гидрологам необходимо определить объем снеготаяния по следующим показателям: площадь распространения снежного покрова S ; водный эквивалент снега ВЭС; и состояние или характеристики снега, такие как высота, плотность, размер зерен и наличие жидкой воды (Engman and Gurney, 1991). Постепенное сокращение площади покрытия снегом является характерной чертой сезонного снежного покрова. Независимо от подхода, используемого для проведения повседневного моделирования стока талых вод, будь то эмпирический подход, основанный на исторических данных, или детерминированный подход, достаточно знать ежедневную площадь бассейна, покрытую снегом, не зная первоначального накопления снега в виде водного эквивалента снега (WMO, 1994).

Для многих бассейнов существует тесная связь между стоком и площадью покрытия снегом (Engman and Gurney, 1991). Но для оперативных прогнозов стока также определяются запасы воды в снеге (WMO, 1994). Дистанционное зондирование предлагает новый ценный инструмент для получения данных о снежном покрове, для того чтобы прогнозировать талый сток (Engman and Gurney, 1991). Остром и др. (Ostrom and others, 1991) разработали методику с использованием данных Национального управления по исследованию океанов и атмосферы США (НУОА) и спутника для наблюдений в видимом и инфракрасном диапазонах спектра (TIROS) с целью измерения остаточного снега и прогноза соответствующего объема снеготаяния для ряда норвежских высокогорных бассейнов. Многие крупные гидроэнергетические компании используют на оперативной основе при планировании производства гидроэлектроэнергии карты распространения снежного покрова, составленные с помощью усовершенствованного радиометра с очень высоким разрешением (NOAA AVHRR) (Andersen, 1991).

Методы дистанционного зондирования с использованием соответствующих диапазонов длин волн позволяют в определенной степени оценить характеристики снежного покрова, такие как размер зерен, альбедо, слоистость, температура поверхности и температура снежного покрова. Это, в свою очередь, позволяет надежно оценивать время, за которое снежный покров готов передать талую воду с поверхности в подстилающий грунт, и в конечном счете сформировать талый сток (Rango, 1993). Первый эмпирический подход к оценке стока талых вод с использованием дистанционного зондирования был разработан Ранго и др. (Rango and others, 1977); они использовали данные спутниковых наблюдений за снежным покровом в эмпирических регрессионных моделях, разработанных для рек Инд и Кабул в Гималаях. Мартинек и Ранго (Martinec and Rango, 1987), Ранго и ван Катвийк (Rango and van Katwijk, 1990) позднее использовали данные дистанционного зондирования о запасах воды в снеге и температуре, чтобы построить модифицированные кривые истощения снежного покрова для использования их в модели стока талых вод для прогнозов снеготаяния в бассейне Рио-Гранде.

В целом дистанционное зондирование дает очень хорошие результаты в горных районах, особенно, когда целью является картирование снежного покрова. Но его использование затруднено в регионах с плотным лесным покровом.

Новые модели, разработанные для использования данных дистанционного зондирования, также позволяют улучшить гидрологические прогнозы талого стока. Кроме того, совместное использование данных дистанционного зондирования с цифровым моделированием рельефа и географических информационных систем даст возможность объективно и систематически объединять различные типы данных (Engman and Gurney, 1991). Цифровое моделирование рельефа применяется для нормализации изображений с использованием данных о высоте Солнца, уклонах, расположении и высоте местности (Baumgartner, 1988; Miller and others, 1982). Географические информационные системы полезны в сочетании масок растительности со спутниковыми снимками (Keller, 1987).

6.3.5 Трансформация руслового стока

Сток с верхнего участка реки движется вниз по течению в виде волны, меняющуюся конфигурацию которой на разных станциях наблюдений можно вычислить по методике, известной как расчет трансформации паводочной волны. Водоохранилища и другие факторы истощают волну. Неоднородность характеристик русла и впадение притоков придают дополнительные

сложности. Трансформация паводочных волн при проходе через водохранилища и русла рек может быть определена различными методами.

6.3.5.1 Гидродинамические методы

Гидрологические исследования позволили получить большой объем знаний о физических процессах, охватывающих весь гидрологический цикл в природе. Подобно этому высокие технологии, применяемые при постоянном получении данных и их обобщении во времени и пространстве в сочетании с возможностями современных компьютеров, позволяют быструю обработку гидрологических и метеорологических данных всех видов. Все это способствовало усовершенствованию третьего типа моделирования — гидродинамического моделирования.

Гидродинамические модели основаны на численном интегрировании уравнений сохранения массы и количества движения, которые описывают физические процессы, происходящие в пределах бассейна. Так как в основе таких моделей лежат физические законы, управляющие этими процессами, экстраполяция за пределами калибровки модели может быть выполнена более уверенно, чем при использовании концептуальных моделей. С помощью динамического метода полного расчета трансформации, который учитывает эффект наращивания скорости течения и уклон водной поверхности, можно надежно определить расходы воды и уровни водной поверхности для следующих случаев неустановившегося движения воды:

- движение волн вверх по течению под влиянием таких воздействий, как приливы или штормовые нагоны с моря;
- явление подпора воды за счет расположенного ниже водохранилища или впадения притока;
- паводковые волны на реках с незначительным уклоном дна, менее 0,05 процента;
- внезапные волны, вызываемые контролируемыми сбросами воды из водохранилища или возникающие при катастрофическом прорыве плотины.

Динамический метод расчета основан, как правило, на одномерных гидродинамических уравнениях неустановившегося потока, известных как уравнения Сен-Венана. Эти уравнения обычно выражены в своей консервативной форме, приведенной ниже:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial s_c (A + A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (6.39)$$

Уравнение количества движения:

$$\frac{\partial (s_m Q)}{\partial t} + \frac{\partial (\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial t} + S_f + S_{ec} \right) - qv_x + W_f B = 0, \quad (6.40)$$

в котором:

$$S_f = \frac{n^e Q}{A^2 R^{4/3}}, \quad (6.41)$$

где Q — расход воды; A — площадь живого сечения; A_0 — неактивная площадь поперечного сечения реки или мертвый объем водохранилища; s_m — коэффициент извилистости; S_{ec} — характеристика расширения-сжатия; β — коэффициент неоднородного распределения скоростей в поперечном сечении; $W_f B$ — противодействие ветра на поверхности воды; h — уровень водной поверхности; v_x — скорость потока в направлении координаты x ; B — ширина потока в живом сечении; n — коэффициент шероховатости Маннинга; R — гидравлический радиус; прочие условные обозначения объяснены выше, кроме:

$$S_{ec} = \frac{K_{ec} \Delta (Q/A)^2}{2 g \Delta x}, \quad (6.42)$$

где K_{ec} — коэффициент расширения-сжатия; $\Delta (Q/A)^2$ — разница значений $(Q/A)^2$ между двумя соседними сечениями, отдаленными друг от друга на расстояние Δx .

Аналитических решений полной нелинейной системы уравнений (6.39)–(6.41) не существует. Численные методы решения вышеупомянутых уравнений для природных рек можно разделить на две большие категории: метод характеристик, который в настоящее время широко не используется, и конечно-разностные методы в явной и неявной форме, которые широко распространены. Конечно-разностные методы преобразуют дифференциальные уравнения в частных производных (6.39) и (6.40) в совокупность алгебраических уравнений. Явные методы позволяют решать эти алгебраические уравнения последовательно в каждом сечении, расчетном пределе и в данный момент времени, в то время как неявные методы решают алгебраические уравнения одновременно для всех расчетных пределов в данный момент времени.

У каждого метода решения есть свои преимущества и недостатки. Необходимо учитывать также такие факторы, как устойчивость решений и сходимости, требуемое время для расчетов и объем памяти ЭВМ, степень сложности программирования и математическая сложность. Некоторые методы перед их использованием требуют приведения уравнений к уравнениям вида (6.39) и (6.40).

В целом неявные методы конечных разностей являются более сложными, но и более эффективными по сравнению с явными методами при расчете неустановившегося движения воды для периода в несколько суток. Неявные методы можно использовать для гораздо более продолжительных интервалов времени. Явные методы просты, однако при их использовании можно столкнуться с проблемами устойчивости численных решений, если не совсем правильно выбран временной интервал. Эти и другие возможные ограничения следует тщательно взвесить, прежде чем выбрать какой-либо определенный подход для разработки динамического метода прогнозирования трансформации волны или при выборе существующего динамического метода расчета для конкретного применения.

Наиболее сложной задачей в случае применения динамического метода расчета трансформации волны при прогнозе реальной ситуации является определение параметра шероховатости S_p , характеризующего сопротивление ложа, приведенного в уравнении (6.40). Параметр шероховатости часто изменяется в зависимости от расхода воды, уровня, а также по длине реки. Препятствием к определению параметра шероховатости по графическим зависимостям его от расхода воды и расстояния способом подбора требует значительного времени. Методика автоматического определения такой связи значительно облегчает оперативное использование динамического метода расчета трансформации при прогнозах. Правильная оценка граничных и начальных условий при решении уравнений Сен-Венана в оперативном режиме является, вероятно, еще одной важной задачей при применении динамического метода расчета трансформации.

Другой важной задачей является создание эффективной системы сбора и обработки данных, являющейся неотъемлемой частью элемента расчетов. Геометрию поперечного сечения следует обрабатывать с максимально возможной эффективностью для последующего использования при динамических расчетах трансформации. Движение воды должно описываться с использованием как можно меньшего количества исходных данных, чтобы применение динамического метода расчета трансформации стало практически возможным при оперативном прогнозировании.

Если немного изменить уравнение количества движения и пренебречь количеством движения за счет боковых притоков, можно получить очень ясную картину, которая показывает существенные различия между динамическим, диффузионным и кинематическим расчетом трансформации.

Рассмотрим:

$$\left[\frac{1}{g} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - s_o + s_f = 0 \right. \quad (6.43)$$

кинематическая модель
 диффузионная модель
 динамическая модель

На первом уровне аппроксимации членами уравнения, характеризующими ускорение, относящиеся к временным изменениям притока и к пространственному изменению скорости, пренебрегают. Получаемая в результате модель рассматривается как диффузионная модель. При некоторых состояниях потока можно пренебречь также членом, характеризующим силу давления, и рассматривать уравнение количества движения как баланс между силами тяжести и трения. Такая аппроксимация известна как кинематическая модель.

Как кинематическая, так и диффузионная аппроксимации успешно используются в последние годы для описания склоновых и русловых потоков в тех случаях, когда уклоны превышают примерно 0,1 процента. Диффузионную модель можно использовать на реках с меньшими уклонами, однако с осторожностью, т. к. инерционные члены уравнения могут стать значимыми. В последние годы кинематическая модель приобрела популярность применительно к тем случаям, когда геометрию и топографию естественных водосборов можно заменить рядом простых элементов, таких как участки с однородными условиями стока и участки русла правильной формы. Кинематические уравнения также используются в моделях качества воды, прогнозирующих перенос загрязняющих веществ. Кинематическая модель не учитывает влияние подпора за счет поступления воды от боковых притоков или за счет расположенного ниже по реке водохранилища; эту модель нельзя также использовать для прогноза распространения волны вверх по течению.

6.3.5.2 Гидрологические методы

Гидрологические методы расчета трансформации паводочной волны используют только уравнение неразрывности или закон сохранения массы. При этом исследуется только распространение волны посредством рассмотрения увеличения и уменьшения объема воды на участке, расположенном между двумя пунктами измерений. Однако поскольку взаимосвязь между запасом воды и потоком определяется эмпирически посредством этих методов, их непосредственное применение невозможно в тех случаях, когда для целей проектирования требуются данные о потоке или уровнях.

При использовании гидрологических методов расчета трансформации сток в верхнем створе задается или

предполагается, а расчет трансформации используется для определения стока и уровня воды в нижнем створе. Расчет трансформации заключается в решении следующего уравнения посредством использования связи между объемом воды и стоком:

$$I - Q = dS/dt, \quad (6.44)$$

где I и Q — расходы соответственно в верхнем и нижнем створах; S — объем воды на участке; и t — время. Решение этого уравнения включает аппроксимацию связи объем–сток, что создает основную трудность в расчетах трансформации гидрологического стока. Однако при достаточном количестве гидрометрических данных эту зависимость можно получить эмпирически.

Простейшие методы расчета трансформации паводочной волны основаны на линейной зависимости между объемом воды и стоком, что дает возможность получить аналитические решения. В практике краткосрочного прогнозирования используются следующие два метода:

а) метод Маскингам, основанный на следующей зависимости между объемом воды и стоком:

$$S = K [xQ_1 + (1 - x)Q_2]. \quad (6.45)$$

Константы K и x определяются эмпирическим путем для изучаемого участка реки по данным о расходах воды. Они могут быть определены с помощью построения графика связи S как функции $xI + (1 - x)Q$ для различных значений x . Наиболее оптимальным является такое значение x , при котором нанесенные на график точки ближе всего расположены к однозначной кривой.

Метод Маскингам часто используется в следующей частной форме:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j, \quad (6.46)$$

где постоянные C_1 , C_2 и C_3 являются функциями параметров K и x и расчетного периода времени Δt . Сумма этих постоянных равна единице.

б) метод характерного участка, предложенный Калининым и Милоковым (1958), основан на следующей линейной связи между расходом и объемом воды:

$$Q = K S, \quad (6.47)$$

где K является постоянной величиной объема, равной времени добегающего на данном участке. Вышеуказанное уравнение применимо для транзитных участков характерной длины L , которая приближенно равна:

$$L = \frac{Q}{Z \frac{\partial Q}{\partial h}}, \quad (6.48)$$

где Z — уклон водной поверхности; а $\partial Q/\partial h$ — тангенс угла наклона кривой расходов. Если отрезок реки состоит из нескольких характерных участков, расчет трансформации выполняется последовательно от верхнего участка течения к нижнему. Вычисленный расход воды для нижнего створа первого участка принимается за начальный расход для второго участка и т. д.

Для длинных участков рек в случае отсутствия данных, необходимых для выделения ряда характерных участков, можно использовать следующую формулу, выражающую трансформацию стока системой одинаковых линейных водохранилищ:

$$Q(t) = I_0 \frac{\Delta t}{K^N (N - 1)!} t^{N-1} e^{-t/K}, \quad (6.49)$$

где N — число характерных участков или водохранилищ; K — время прохода одного характерного участка; I_0 — приток к первому характерному участку; и t — время. Параметры K и N определяются методом подбора или путем оптимизации.

6.3.5.3 Трансформация паводковой волны водохранилищем

Водохранилище приводит к значительному уменьшению максимального расхода по сравнению с тем, который произошел бы, если бы водохранилища не было, т. е. прохождение паводка через водохранилище существенно отличается от его прохождения по руслу реки.

Поскольку скорость движения паводочной волны в водохранилище выше, чем в руслах, то запаздывание пика вытекающего потока относительно пика притока совсем не означает, что такое же запаздывание имело бы место в условиях до сооружения водохранилища. Кроме того, сооружение водохранилища может иногда способствовать ухудшению условий прохождения паводка на нижнем участке независимо от влияния водохранилища на снижение пикового расхода. Ослабленный пик может совпасть по фазе с пиками притоков, что обычно наблюдалось во времена до создания водохранилища. Таким образом, сооружение водохранилища не следует считать гарантией улучшения условий прохождения паводков на нижележащем участке реки. Необходимы тщательные гидрологические и гидравлические исследования для проектных условий.

6.3.5.4 Прорывы плотин

Катастрофический внезапный бурный паводок имеет место в случае прорыва плотины, когда через образовавшуюся брешь в плотине устремляется вода и затопливает нижерасположенные участки долины. Прорванная плотина может быть построена человеком или, например, это может быть естественное заграждение в результате скопления льда или речного мусора и т. д. Часто сток при разрушении плотины во много раз превосходит предыдущий паводок на соответствующей реке. Очень немного известно о характере разрушений искусственных или естественных плотин. Поэтому прогнозирование наводнения при разрушении плотины в реальном времени почти всегда ограничивается случаями, когда действительно наблюдалось разрушение плотины. Последствия от прорыва плотины должны учитываться на стадии планирования сооружения плотины, когда оцениваются площади затопления нижерасположенных участков и намечаются чрезвычайные мероприятия по защите от затопления или эвакуации населения.

В ранних классических исследованиях этой проблемы предполагалось мгновенное разрушение плотины, и принимались идеализированные условия нижнего бьефа. Позднее инженеры предложили подход к решению этой проблемы, исходя из предположения, что гидрограф стока имеет треугольную форму и определяется по уравнению Шошлица или подобному уравнению максимального стока:

$$Q_m = \frac{8}{27} W_d \sqrt{g Y_0^3}, \quad (6.50)$$

где g — ускорение свободного падения; W_d — ширина брешки в теле плотины и Y_0 — высота уровня воды в верхнем бьефе. Используя уравнение (6.49) и эмпирический коэффициент спада волны, рассчитывается искусственный гидрограф трансформации волны вниз по течению реки с помощью гидрологических методов расчета трансформации паводочной волны. В качестве альтернативы могут использоваться динамические методы расчета (см. раздел 6.3.4.2) для расчета трансформации быстро изменяющейся и относительно большой волны прорыва. В расчете принимаются во внимание нижерасположенные плотины, объем вышедшей из берегов воды, нижерасположенные насыпи шоссежных дорог и потери при расширении и сужении речной долины.

Так как время является существенным фактором при составлении прогноза паводка от прорыва плотины в реальном масштабе времени, оперативные методы должны быть эффективными с точки зрения вычислений. Однако еще более важным фактором является потребность в данных для процесса прогнозирования.

Если используется динамический метод расчета, то необходимо сделать все, чтобы минимизировать количество данных о поперечном сечении, необходимых на стадии прогноза трансформации волны прорыва, и все данные и программные файлы должны быть готовы к немедленному использованию.

6.3.6 Моделирование других процессов

6.3.6.1 Моделирование переноса наносов

Модели переноса наносов позволяют прогнозировать количество наносов, перенос потоком и направление развития донных отложений на основе данных о высотных отметках водной поверхности или скоростей течения, определенных с помощью гидродинамической модели (см. раздел 6.3.4.2), являющейся неотъемлемой частью модели переноса наносов, в основе которой лежит численное решение уравнений неразрывности и количества движения Сен-Венана.

Основные процессы, связанные с переносом наносов — эрозия, захват, перенос и отложение. Отложения наносов на дне потока будут оставаться неподвижными до тех пор, пока движущие силы в области течения меньше, чем критический порог напряжения сдвига для эрозии. Как только этот порог будет достигнут, отложения начинают двигаться, прыгая или подсакивая, перекачиваясь и скользя. Это движение известно как движение донных наносов. Различные исследователи разработали соотношения, описывающие движение донных наносов в зависимости от напряжения сдвига и диаметра частиц. Эти соотношения известны как функции переноса наносов и в основном применимы к несвязным материалам (см. раздел 4.8.6).

Вычисление скорости осаждения частиц необходимо для нескольких функций переноса несвязных наносов:

$$\omega_f = F \sqrt{dg(G-1)}, \quad (6.51)$$

где:

$$F = \left[\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{gd^3(G-1)} \right]^{1/2} - \left[\frac{36\nu^2}{gd^3(G-1)} \right]^{1/2} \quad (6.52)$$

для частиц диаметром d в диапазоне от 0,0625 мм до 1 мм. Для частиц более 1 мм $F = 0,79$. В приведенных выше уравнениях ω_f — это гидравлическая крупность наносов; g — ускорение свободного падения; G — удельный вес наносов и ν — кинематическая вязкость воды.

Большинство моделей переноса наносов позволяют использовать не одну функцию, так как не существует универсальной функции, которую можно точно использовать для всех наносов и условий потока. Большая часть этих функций переноса разработана для

расчета общего количества донных отложений без разбивки на фракции по размеру частиц. Некоторые модели используют эти функции для различных фракций, чтобы выявить изменения распределения донных наносов по диаметру частиц, и могут воспроизводить процессы перемешивания донных наносов и, следовательно, эффект армирования.

Большая часть осадков может характеризоваться переносом во взвешенном состоянии. Расчеты количества взвешенных наносов включают пространственно-временное отставание изменений в режиме наносов в ответ на изменения местных гидравлических условий. Связные наносы при переносе будут оставаться во взвешенном состоянии, пока напряжение сдвига превышает критическое значение для осаждения. Связные наносы, как правило, отделяются в единицы низкой плотности — процесс, который сильно зависит от типа наносов, концентрации ионов в воде и условий потока, а также скорости осаждения, которая больше не является функцией размера частиц. Это объединение учитывается в моделях с помощью оценки скоростей осаждения. В общем одновременное осаждение и эрозия связных осадков не наблюдаются, но структура связных донных отложений все же меняется со временем и по мере их пополнения.

Чистое изменение высотных отметок дна не будет иметь место, если только скорость эрозии не будет отличаться от скорости осаждения; эти два процесса идут непрерывно и независимо. Изменение уровней дна может быть определено по уравнению непрерывности наносов. Уравнение выводится на основе предположения, что изменения в объеме взвешенных наносов значительно меньше, чем изменения в объеме донных наносов, что, как правило, справедливо при моделировании устойчивого потока на длинном временном отрезке. Уравнение сохранения массы для наносов сводится к следующему виду:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial A_d}{\partial t} - q_s = 0 \quad (6.53)$$

где ε — объем отложений на единицу поверхности дна (минус пористость); A_d — объем отложений на единицу длины; Q_s — расход наносов и q_s — боковое поступление наносов на единицу длины.

Некоторые модели переноса наносов и морфологические модели, например MIKE 21C, учитывают вихревые потоки при моделировании переноса наносов для того, чтобы моделировать развитие эрозии излучин, слияние рек и формирование как единичных отмелей, так и перемежающихся. Эти модели дают криволинейные расчетные сетки, которые больше подходят для моделирования морфологии реки. Эрозия берегов учитывается в каждом расчетном шаге. Эродированный

береговой материал включен в решение уравнения непрерывности осадка. Эрозия берегов приводит к отступлению береговой линии, что моделируется за счет перемещения адаптивной криволинейной сетки.

Дополнительную информацию о моделировании переноса наносов можно найти в разделе 4.8.6.

6.3.6.2 Моделирование качества воды

Управление качеством воды в естественных и искусственных водоемах представляет собой комплексную задачу, для решения которой требуется мониторинг характеристик качества воды, интерпретация полученных в процессе мониторинга данных в отношении влияющих факторов и прогноз будущих изменений этих характеристик применительно к различным рассматриваемым вариантам управления. Использование моделей качества воды может оказать большую помощь в решении этих проблем. Эти модели позволяют делать прогнозы, основываясь на следующих данных:

- ряды входных данных по количеству поступающих загрязняющих веществ;
- начальные метеорологические условия и условия состояния окружающей среды;
- гидравлические и гидрологические характеристики водных объектов и их водосборов;
- изменения во времени или по территории характеристик качества воды водных объектов применительно к различным вариантам управления водными ресурсами.

Модели качества воды часто связаны с гидравлическими и гидрологическими моделями.

Математические модели качества воды могут быть классифицированы в соответствии с общей классификацией моделей (см. раздел 6.1) и по следующим критериям:

- компоненты качества воды: одно- или многокомпонентные модели;
- тип моделируемого компонента: в консервативной форме (например, соль); неконсервативной физической форме (например, температура); неконсервативной химической форме (например, растворенный кислород); или неконсервативной биологической форме (например, коликоподобные бактерии).

Моделями, наиболее часто используемыми на практике для описания переноса загрязнения в реках, являются одномерные модели, основанные на адвективно-дисперсном уравнении:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (6.54)$$

где c — концентрация загрязняющего вещества; u — средняя скорость течения воды; D — коэффициент продольного перемешивания; t — время и x — расстояние.

Коэффициент продольного перемешивания рассчитывается на основе уравнения Фишера:

$$D_L = \frac{0,07 u'^2 l^2}{\varepsilon_z}, \quad (6.55)$$

в котором u'^2 — отклонение от среднего поперечного сечения; l — расстояние от стрежня до наиболее удаленного берега и ε_z — коэффициент поперечного перемешивания.

Чтобы применять эти модели для исследования переноса загрязнения в реке, река разделяется на участки (каждый длиной в несколько километров), в пределах которых скорость течения воды принимается постоянной. Эта скорость в пределах каждого сектора рассчитывается с использованием гидравлической или гидрологической модели (раздел 6.3.4).

Модели качества воды могут использоваться в сфере управления качеством воды для различных целей, включая проектирование сетей мониторинга качества воды во времени и по территории, анализ полученных данных в отношении факторов, определяющих качество воды, взаимодействие с другими экологическими (воздух, почва) моделями загрязнения, оценку трендов качества воды с учетом или без учета различных альтернативных мер по ограничению загрязнения и прогноз времени распространения загрязняющих веществ и профиля концентрации вдоль реки.

Модели качества воды применялись с различным успехом для решения проблем управления качеством вод во многих странах (Biswas, 1981). Например, относительно простая модель была использована для исследования влияния на качество воды значительных перебросок стока из реки Северн в реку Темза в Соединенном Королевстве Великобритании и Северной Ирландии. Модель была использована для оценки влияния такой переброски на концентрацию многочисленных консервативных и почти консервативных веществ, содержащихся в воде. Модель основана на разделении речного стока по источникам питания (поверхностный, грунтовый и почвенный сток) и на установленных соотношениях между концентрациями рассматриваемых определяющих факторов со стоком воды и его изменчивостью для каждого источника. Результаты моделирования показали достаточно хорошее соответствие с зарегистрированными данными.

Еще одним примером практического применения моделей качества воды для целей управления

водохозяйственной деятельностью является изучение влияния устранения нагрузки по БПК на водоочистных сооружениях на концентрацию растворенного кислорода в воде реки Темза в провинции Онтарио, Канада. Результаты показывают, что получение концентраций растворенного кислорода выше критерия, соответствующего хорошему качеству воды, в результате устранения нагрузки на БПК практически возможно в одной точке, в то время как в другой точке это было бы затруднительно. Публикация ВМО *Hydrological Aspects of Accidental Pollution of Water Bodies* (Гидрологические аспекты аварийного загрязнения водных объектов) (ВМО-№. 754) содержит детальный обзор некоторых моделей качества воды, применяемых в Германии, Канаде, Польше, Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки и Франции для различных рек, имеющих существенные проблемы, связанные с загрязнением воды.

Модели качества воды также используются для расчетов распространения аварийных загрязнений. Такие модели используются на реке Рейн с 1989 г. Хотя в большинстве моделей, упомянутых выше, рассматриваются, главным образом, загрязнители, поступающие из промышленных и муниципальных сточных вод, в некоторых моделях рассматриваются также загрязнения из рассеянных источников, относящихся, например, к лесохозяйственной и сельскохозяйственной деятельности или к жилым строениям без канализации.

Среди наиболее часто применяемых моделей фигурирует модель SWAT, которая служит для оценивания состояния почв и воды. Она позволяет исследовать распространение загрязняющих веществ, поступающих в воду от диффузионных источников, таких как сельскохозяйственные угодья. SWAT — это модель бассейнового масштаба, разработанная Арнольдом и его соавторами для Службы сельскохозяйственных исследований Министерства сельского хозяйства США в целях прогнозирования влияния различных форм землепользования на водные ресурсы, наносы и сельскохозяйственные химические выходы (Arnold and others, 1993). Модель объединяет важные физические и полуэмпирические элементы и может быть охарактеризована как физическая модель. Однако она требует специализированной информации о погоде, характеристиках почвы, топографии местности, растительности и практических методах землеустройства и землепользования в пределах водосбора. Физические процессы, связанные с движением воды, наносов, ростом зерновых культур, циклом питательных веществ и т. п., напрямую моделируются SWAT с использованием этих входных данных. SWAT — это модель с непрерывным временным циклом и не предназначена для моделирования отдельных случаев, например наводнений с почасовым шагом.

Задача SWAT — прогноз воздействия управленческих решений на водные ресурсы, наносы, содержание питательных веществ и пестицидов с достаточной точностью на больших речных бассейнах, для которых нет данных гидрологических наблюдений. Модель включает следующие компоненты: метеорологические условия, поверхностный сток, возвратный сток, просачивание, эвапотранспирация, потери воды при перераспределении стока, накопление воды в прудах и водохранилищах, рост зерновых культур и орошение, подземный сток, формирование русла, содержание питательных веществ и пестицидов и водный перенос. Интерфейсы для модели разработаны в Windows (Visual Basic), GRASS и ArcView. Модель SWAT прошла сквозь серьезные проверки. Для получения дополнительной информации см. <http://www.brc.tamus.edu/swat>.

Некоторые последующие модели разработаны на основе модели SWAT. Например, SWIM — комплексная модель для почвы и воды была разработана Крысановой и др. (Krysanova and others, 1998, 2000) специально для оценки воздействия климатических изменений и изменения землепользования в мезомасштабе для больших бассейнов и региональных целей. Она включает трехуровневую схему разбивки на гидрологические слои и несколько измененных процедур, например трассирование рек и модули лесонасаждений, а также новые процедуры для изучения воздействий, таких как генератор урожая, интерполяция климатических данных, регулирование фотосинтеза и транспирации применительно к высоким значениям CO₂, удерживание питательных веществ и модуль углеродного цикла.

Существуют многочисленные модели, которые имитируют химический обмен в водоносных горизонтах. Некоторые из них сделаны на заказ для специфических ситуаций, а другие связаны с моделями стока, например MT3D связана с MODFLOW.

В случае грунтовых вод моделирование качества воды зависит от понимания режима движения вод в водоносном горизонте. Таким образом, пока направление и величина подземного стока и их изменчивость неизвестны, нет смысла пытаться моделировать сложные химические изменения в водоносном горизонте. Однако, имея представление о химических процессах в водоносных горизонтах и о распределении химических элементов как природных, так и антропогенного происхождения, можно получить представление о подземном стоке. Таким образом, два процесса могут быть использованы совместно для содействия общей калибровке.

6.3.6.3 Моделирование образования льда

Формирование льда на реке начинается, когда поверхность воды охлаждается до 0 °C. В нижележащих слоях

температура воды обычно остается положительной. Таким образом, прогноз даты появления льда состоит из расчета теплообмена на поверхности воды, при котором поверхностный слой воды охладится до 0 °C.

Прогнозирование температуры воды должно выполняться поэтапным решением уравнения теплового баланса, принимая во внимание переменные, влияющие на потери тепла. Тепловые потери с поверхности воды являются функцией температуры воздуха, скорости ветра и турбулентного перемешивания воды. В самом общем виде уравнение теплового баланса на границе воздух-вода за определенный интервал времени выглядит следующим образом:

$$\alpha (\bar{\theta}_w - \theta_{sw}) + Q = 0, \quad (6.56)$$

где $\bar{\theta}_w$ — средняя температура водной массы потока; θ_{sw} — температуры поверхности воды (в °K); α — коэффициент теплопередачи (ватт/м²°K) от воды к границе воздух-вода и Q — потери тепла с водной поверхности, ватт/м².

В основе современных краткосрочных прогнозов даты появления льда на реках лежит метод, разработанный в публикациях Гидрометеоздата (1989). Он базируется на разнице между двумя тепловыми потоками:

$$\alpha_n T_{wn} \leq -Q_m^* \text{ или } T_{wn} \leq -\frac{Q_m^*}{\alpha_n}, \quad (6.57)$$

где T_w — средняя температура воды в реке; α_n — коэффициент теплоотдачи водоема; Q_m^* — потери тепла через границу атмосфера-вода, и n — относится ко времени, за которое эта разница наблюдается. Расчет α_n , T_w и Q_m^* требует знания некоторых метеорологических и гидрологических переменных. Метод используется при наличии прогнозов температуры воздуха на несколько дней вперед. Точность метода зависит, главным образом, от ошибок прогнозирования температуры воздуха.

Необходимое условие начала ледостава — накопление достаточного количества плавучего льда при интенсивных потерях тепла, при которых смерзшиеся льдины выдерживают воздействие, оказываемое текущей водой. Это условие выражается следующей эмпирической формулой:

$$(Q_a)_c = -6,5 v^2 \left(\frac{b}{\sum Q_a} \right)^{0,8}, \quad (6.58)$$

где $(Q_a)_c$ — критическая или наибольшая из возможных среднесуточная температура воздуха в день замерзания; v — средняя скорость течения; b — ширина реки и $\sum Q_a$ — сумма средних суточных температур со дня появления льда (Бужин и др., 1989). Расчеты производят вместе с последовательным прогнозом средней

суточной температуры для каждого дня, пока средняя суточная температура воздуха не опустится ниже критической точки $(Q_c)_c$, рассчитанной в уравнении (6.55). День, когда критическая точка достигнута, рассматривается как прогнозная дата начала ледостава.

В операционной практике полная версия модели формирования ледового покрова, в т. ч. некоторые формы упрощенного обновления в отношении конкретного расположения и гидрометеорологических данных, обычно не используется. Как правило, разработка модели и ее приложения выполняются с учетом потребностей пользователей. Таким образом, работа схем по управлению водными ресурсами в зимних условиях должна быть основана на соответствующих отчетах и прогнозах. Гидрологическая сеть, на которой производятся наблюдения за ледовыми явлениями и которая может эксплуатироваться в соответствии с прогностическими потребностями, должна осуществляться в соответствии с этими принципами.

Необходима регулярная обратная связь водохозяйственников с прогностическим центром. Для выработки гидроэнергетики важно иметь прогнозы появления донного льда и шуги. Для этой цели разработаны эмпирические формулы, основанные на упрощенном варианте теоретического метода. В большинстве случаев эмпирические соотношения представлены в виде номограмм, пример которых приводится на рисунке II.6.16.

Краткосрочное прогнозирование ледовых явлений основано на знании физических или статистических закономерностей, которые существуют как необходимые условия для образования льда (Гидрометеоздат,

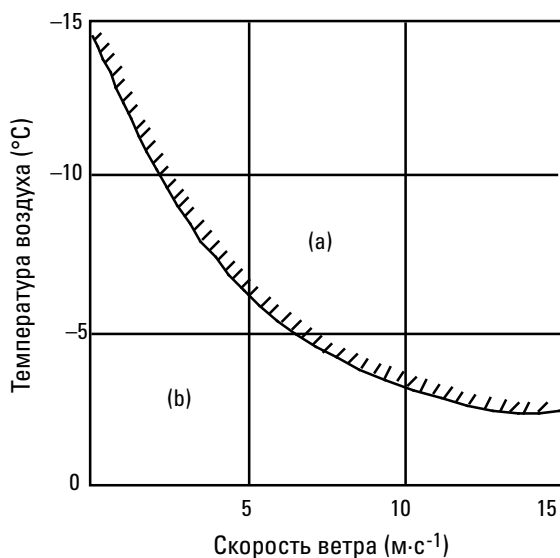


Рисунок II.6.16. Прогнозирование образования шуги: (a) возможна шуга; (b) отсутствие шуги

1989). Физическая интерпретация этих закономерностей основана на теоретических знаниях о процессах, которые регулируют охлаждение массы воды в естественных озерах. Эти уравнения используются для определения критических или пороговых температурах воздуха, или сумм отрицательных температур воздуха, превышение которых приведет к возникновению ледяного покрова на водоеме. Поскольку замерзание водохранилища зависит от теплосодержания массы воды, критическая температура воздуха определяется с помощью эмпирического отношения, связывающего эту температуру воздуха с параметрами водоснабжения, определяемыми по уровням или расходам воды.

6.3.6.4 Моделирование толщины льда

Помимо прогнозов сроков появления льда и образования ледяного покрова выпускаются и другие виды прогнозов осенних ледовых явлений. В основе прогнозов толщины льда лежит вычисление тепловых потерь. Нарастание толщины льда в основном происходит с его нижней поверхности и определяется тепловым состоянием толщи воды. Иногда нарастание льда происходит с верхней поверхности вследствие замерзания воды, образовавшейся при таянии снега. Талая вода часто сопровождается выпадением атмосферных осадков. Все это может также привести к дополнительному количеству воды на ледяном покрове и к увеличению давления на лед. Прогнозирование толщины льда основывается на оценке разницы между притоком тепла из толщи воды к нижней поверхности льда и оттоком тепла через поверхность льда в атмосферу. Потеря тепла приводит к увеличению толщины льда:

$$\Delta h_{лед} = \frac{\sum_1^t B_i \sum_1^t C_i}{L_{лед} \rho_{лед}}, \tag{6.59}$$

где $\Delta h_{лед}$ — нарастание толщины льда в сантиметрах; $\sum_1^t B_i$ — нарастание толщины льда в сантиметрах; $\sum_1^t C_i$ — приток тепла к нижней поверхности льда; $L_{лед}$ — удельная теплота ледообразования и $\rho_{лед}$ — плотность льда.

Формулы для расчета и прогноза толщины льда в различных условиях ледообразования представлены в соответствующей литературе.

6.3.6.5 Моделирование вскрытия ледяного покрова

Один из методов для прогнозирования даты вскрытия ледяного покрова основан на оценке критической суммы градусо-дней положительной температуры воздуха, необходимой для вскрытия ледяного покрова на участке реки. Для определения этой суммы используется соотношение между разрушением льда и отрицательной суммой градусо-дней зимнего периода.

Чтобы получить дату вскрытия ледяного покрова по этому методу необходимо иметь прогноз температуры воздуха на несколько дней вперед. Необходимая дата получается путем расчета суммы градусо-дней и сравнения ее с критическим значением с использованием ожидаемых температур воздуха на несколько дней вперед.

Прогнозы сокращения толщины льда и прочности ледяного покрова, а также прогнозы вскрытия рек и очищения ото льда водоемов выпускаются с помощью моделей разрушения ледяного покрова, таких как модели, которые могут быть найдены в публикациях Гидрометеоздата (1989), или модель Булатова. Последний метод прогнозирования разрушения льда на реках был разработан с использованием обобщенного уравнения, позволяющего выпуск среднесрочных прогнозов с заблаговременностью 10 дней. Он делает возможным разработку прогнозов вскрытия рек льда повсеместно, в т. ч. для рек с редкой сетью наблюдательных постов (Борщ и др., 1987).

6.3.6.5.1 Вскрытие водохранилищ ото льда

Вскрытие ледяного покрова на водохранилище является следствием таяния и постепенного уменьшения плотности льда. Под воздействием ветра лед может разламываться на отдельные льдины различных размеров, которые затем начинают перемещаться по водохранилищу в виде общего дрейфа льда. Условие начала ледохода выражается неравенством следующего вида:

$$\varphi d_g^{1/2} \leq CU^2, \quad (6.60)$$

где φ — плотность тающего льда (относительное напряжение при изгибе); d_g — толщина льда, сантиметры; U — максимальная скорость ветра за 24-часовой период, м·с⁻¹, и C — эмпирический коэффициент, который зависит от скорости ветра и постоянен для данного водохранилища. Для некоторых водохранилищ в странах Содружества Независимых Государств значение коэффициента C равно 0,018. Плотность φ и толщина льда d_g к началу дрейфа рассчитываются по метеорологическим элементам с использованием уравнений теплового баланса. Более подробные сведения по применению этого метода можно найти в публикациях Гидрометеоздата (1989).

6.3.6.5.2 Прогнозы вскрытия ледяного покрова на реках

Прогнозирование вскрытия рек может основываться на моделях, в которых условие разрушения ледяного покрова определяется по толщине и плотности льда, а также движущей силе потока. Когда силы сопротивления становятся равными или меньше движущей силы, ледяной покров разрушается и начинается ледоход.

Условие для вскрытия ледяного покрова выражается соотношением:

$$\varphi d_g \leq f(H, \Delta H), \quad (6.61)$$

где φd_g — произведение относительного напряжения тающего льда при изгибе на толщину льда является мерой плотности ледяного покрова в момент разрушения; H и ΔH — параметры, характеризующие движущую силу потока. H — высота уровня воды в момент разрушения ледяного покрова (характеризует расход и скорость потока); ΔH — подъем воды к моменту вскрытия над минимальным зимним уровнем H_3 , численно равным $\Delta H = H - H_3$. Так как H и ΔH взаимосвязаны в большинстве случаев, достаточно учитывать только одну из этих величин в соотношении, описанном в уравнении (6.61). Эти величины основаны на прогнозе метеорологических условий и на реальных данных измерений за несколько дней до начала вскрытия льда. Аппроксимация этого соотношения может быть представлена в следующем виде:

$$\varphi d_g \leq a + b (\Delta H)^2, \quad (6.62)$$

где a и b — эмпирические коэффициенты.

Для прогнозирования сроков вскрытия рек, на которых не проводились наблюдения, а также рек с короткими рядами гидрометрических наблюдений была разработана методика на основе следующего обобщенного уравнения:

$$\begin{aligned} (\varphi d_g)_{b-i} / (\varphi d_g)_N &\leq [1 - e^{-(i+1)(Q_{b-i})/(Q_b)_N}] \\ &(\varphi d_g)_{b-i} / (Q_b)_N + 0,005i + 0,25, \end{aligned} \quad (6.63)$$

где $(\varphi d_g)_N$ — средняя относительная продолжительность ледостава ко дню вскрытия; $(\varphi d_g)_{b-i}$ — относительная продолжительность ледостава за i дней до вскрытия; Q_{b-i} — расход воды за i дней до вскрытия; $(Q_b)_N$ — средний расход воды в день вскрытия. Расчет и прогнозирование $(\varphi d_g)_N$, $(Q_b)_N$ и d_g выполняются с использованием специально разработанных карт, номограмм и таблиц (Борщ и Силантьева, 1987).

Модель вскрытия рек позволяет выпускать некоторые дополнительные специализированные прогнозы, такие как прогноз максимально допустимой нагрузки для льда и адресные прогнозы для развертывания ледоколов.

6.4 ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

6.4.1 Надежность и наличие входных данных

Одной из проблем, связанных с речными бассейнами, на которых не проводились наблюдения, является необходимость большого наличия и надежности данных, используемых в моделях. Это может включать исходные временные ряды данных, например об осадках и испарении, и временные ряды данных, используемых для калибровки и проверки результатов моделирования, например о стоке воды, об уровнях грунтовых вод и о качестве воды, а также информацию, которая используется для оценки параметров модели. Для того чтобы гидрологические модели реализовали свой истинный потенциал как оперативные инструменты управления водными ресурсами, важно наличие информации, необходимой для их применения. Обработанные спутниковые снимки используются в исследовательских проектах при моделировании в течение целого ряда лет, и есть примеры использования такой технологии в оперативных целях. Однако существует огромный потенциал для более широкого использования этих методов агентствами по управлению водными ресурсами, особенно в развивающихся странах, где наземные наблюдения не являются непрерывными.

Глобальные или почти глобальные комплекты данных, представляющие разнообразную информацию о земной поверхности, поступающую со спутников, становятся все более обширными и доступными. Имеющаяся информация включает в себя относительно устойчивые характеристики, такие как рельеф местности, почвенно-растительный покров (d'Herbès and Valentin, 1997), а также временные ряды изменения таких параметров, как температура (Xiang and Smith, 1997), испарение (Kite and Droogers, 2000), влажность почвы (Valentijn and others, 2001) и осадки (WMO-WCRP, 1986). Многие из них способны заполнить некоторые пробелы в информации и обеспечить исходные данные для моделей оценки водных ресурсов. Однако некоторые практические соображения должны быть учтены в целях успешного и надежного использования такой продукции:

- a) гидрологические модели, калиброванные по данным исторических наблюдений, уже могут использоваться;
- b) спутниковые данные имеют относительно короткий период наблюдений;
- c) оптимально данные приземных наблюдений и со спутников должны использоваться вместе; по этой причине отношения между данными от этих двух источников информации должны быть количественно оценены и хорошо понятны;

- d) данные должны быть доступны для использования специалистами, занимающимися на практике вопросами водных ресурсов в развивающихся странах;
- e) методы, необходимые для эффективного использования данных, не должны быть чрезмерно сложными или трудными для понимания, поскольку возможности для анализа и обработки данных зачастую ограничены в развивающихся странах.

Одна из задач гидрологического моделирования в будущем — расширение оперативного использования этих методов. Следствием этого является необходимость обеспечения надежности и репрезентативности результатов, насколько это возможно. По крайней мере, важно понимать ограничения и границы погрешностей результатов моделирования, чтобы решения по освоению водных ресурсов принимались на основе адекватной информации. Следующий подраздел посвящен одной из целей инициативы Международной ассоциации гидрологических наук, связанной с проведением Десятилетия по прогнозированию на неизученных бассейнах: сокращение погрешности прогнозов. Для оперативного использования моделей важно не только уменьшить погрешность, но и количественно оценить ее при глубоком понимании точности исходных данных.

6.4.2 Неизученные водосборы

Во многих частях мира имеются водосборы либо не охваченные сетью гидрометрических наблюдений, либо охваченные не в должной мере, а ситуация усугубляется тем, что существующие сети наблюдений находятся в состоянии упадка. В то же время нагрузка на водные ресурсы растет в мире, который становится все более заселенным, а спрос на воду в расчете на душу населения постоянно возрастает. В связи с этим при снижении запасов воды растет потребность в данных наблюдений. Перед сообществами специалистов, занимающихся проблемами гидрологии и водных ресурсов, встала серьезная проблема: найти средства для оценки и управления водными ресурсами в условиях недостаточной обеспеченности данными.

Потребность в методах, применимых для бассейнов, для которых нет данных гидрологических наблюдений, появилась уже давно. Рациональная формула XIX века, основанная на понятии коэффициента стока, является предвестником районирования. Экстраполяция данных с изученных бассейнов на бассейны, на которых не проводились наблюдения, при решении гидрологических задач была стандартной практикой. В этом разделе содержится несколько примеров применения такого подхода. Искусственные единичные гидрографы и геоморфоклиматические единичные гидрографы,

упомянутые в разделе 6.3.2.2.5, позволяют оценить гидрограф стока для районов с короткими рядами наблюдений за стоком и осадками и при их отсутствии. Проблема оценки представлена в разделе 6.2.3, где дается введение в геостатистику для оценки значения переменной в пункте с отсутствием данных на основе значений этой переменной, измеренных в других пунктах.

Например, районирование на национальном уровне в Соединенном Королевстве изложено в *Flood Estimation Handbook* (Руководство по оценке паводков), опубликованном в 1999 г., которое заменило *Flood Studies Report* (Доклад об исследованиях наводнений) и дополнения к нему. Руководство объясняет районирование параметров модели и экстраполяцию данных с изученных водосборов на неизученные. Рекомендуется проводить оценку повторяемости паводков путем статистического анализа максимального расхода половодья, годового максимума или критических значений, или же с помощью связи осадков со стоком в случае наличия достаточно длинных рядов наблюдений. Хотя данные о паводке в наблюдаемом месте имеют наибольшее значение, данные могут быть перенесены из близлежащего места, водосбора-донора, водосбора со схожими характеристиками или аналога, если поблизости нет водосбора-донора. Оценка индекса паводка — среднего годового паводка — в отсутствие данных о максимуме может быть осуществлена с помощью дескрипторов. Обобщенный анализ может быть необходим для оценки кривой роста, зависящей от длины ряда данных наблюдений или целевого периода, например один паводок в 100 или 10 лет. Последним выбором является оценка параметров модели типа «осадки–сток» с использованием только дескрипторов водосбора.

Международная ассоциация гидрологических наук, которая объявила проведение Десятилетия по прогнозированию на неизученных бассейнах 2003-2012 годов, стремится достичь значительного прогресса в прогнозировании на водосборах, где не проводились наблюдения (Sivapalan and others, 2003). Следует надеяться, что это Десятилетие принесет уменьшение погрешности прогнозов и будет способствовать развитию новых теорий, основанных на масштабировании и мультимасштабировании, комплексных системах, нелинейной динамике и экогидрологических отношениях. Это не может быть сделано без расширения диапазона и масштаба наблюдений, используемых при оценке гидрологических переменных. Эта инициатива представляет значительный интерес для практической гидрологии, и есть надежда, что к концу десятилетия, инструментарий оперативных методов для работы с неизученными бассейнами значительно вырастет.

6.4.3 Стыковка моделей

С учетом того, что все чаще приходится сталкиваться с комплексным управлением водными ресурсами, насущной задачей становится использование нескольких моделей для решения практических задач. В качестве примера можно назвать комбинированное использование моделей оценки качества и количества воды с системными моделями и экономическими моделями. Еще один пример — использование климатических моделей для получения метеорологических исходных данных, используемых в гидрологических моделях. В прошлом этого можно было достичь путем отдельного моделирования различных процессов и использования выходных данных одной модели в качестве входных данных в следующей. Но этот подход игнорирует многие обратные связи, которые существуют в сложных природных системах. Лучшим подходом является параллельный запуск моделей, причем процессы взаимосвязаны на каждом шаге моделирования и включены механизмы обратной связи. Использование традиционных методов предполагает объединение всех алгоритмов отдельных моделей в единую модель — основное задание на разработку, которая исключает возможность гибкого выбора различных подходов к моделированию для конкретных применений. Стыковке моделей может способствовать развитие систем моделирования, которое объединяет управление данными, средства визуализации географической информационной системы и включение моделей в единый пакет программного обеспечения для нескольких моделей. Во всем мире есть целый ряд таких систем, разработанных для различных целей. Примеры можно найти на <http://www.epa.gov/waterscience/basins/bsnsdocs.html> и в работе (Hughes, 2004b).

Одна из последних инноваций, the Open Modelling Interface (OpenMI — см. <http://www.harmonit.org>), представляет собой попытку разработать модели для моделирования различных связанных с водой процессов, которые будут увязаны на временной и пространственной основе и таким образом позволят моделировать взаимодействие процессов. Цель заключается в упрощении связи параллельно работающих моделей, эксплуатируемых в различных временных и пространственных масштабах, посредством прямой передачи данных между моделями. Ожидается, что многие существующие модели в ближайшем будущем должны стать совместимыми с OpenMI.

Ссылки и дополнительная литература

Борщ С.В. и Силантьева Т.П., 1987: Метод краткосрочного и среднесрочного прогнозирования вскрытия рек на основе обобщенной зависимости. Методические указания. Москва, Гидрометцентр СССР. 28 с.

- Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 3.*
Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах, 1989. Ленинград, Гидрометеоздат, 168 с.
- Калинин Г.П. и Милоков П.И., 1958: *Приближенные методы расчета неустановившегося движения водных масс.* Труды ЦИП, вып. 66.
- Andersen, T., 1991: AVHRR data for snow mapping in Norway, *Proceedings of the 5th AVHRR Data Users Meeting*, Tromsø, Norway.
- Anderson, E.A., 1973: National Weather Service River Forecast System: Snow Accumulation and Ablation Model, Programs and Test Data. *NOAA NWSHYDRO Technical Memorandum 17.*
- Anderson, M. P., D.S. Ward, E.G Lappala and T.A. Prickett, 1992: *Computer models for subsurface water.* Chapter 22 in: Maidment, D. R. (ed.) *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, 22-1 to 22-34.
- Arnold, J.G., P.M. Allen and G. Bernhardt, 1993: A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 142:47-69.
- Baumgartner, M. F., 1988: Snowmelt runoff simulation based on snow cover mapping using digital Landsat-MSS and NOAA/AVHRR data, USDA-ARS, *Hydrology Lab. Tech. Rep.*
- Bear, J., 1980: *Hydraulics of Groundwater.* New York, NY: McGraw-Hill College, 1980. ISBN: 0070041709.
- Bear, Jacob. 1988: *Dynamics of Fluids in Porous Media.* New York, NY: Dover Publications, 1988. ISBN: 0486656756.
- Beldring, S., K. Engeland, L.A. Roald, N.R. Saelthun and A. Voks, 2003: Estimation of parameters in a distributed precipitation – runoff model for Norway. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(3):304-316.
- Bergström, S., 1992: *The HBV model – its structure and applications.* SMHI Reports RH, No. 4, Norrköping, Sweden.
- , 1995: The HBV model. In Singh, V.P. (ed): *Computer Models of Watershed Hydrology*, *Water Resources Publications.* Colorado, United States, 443, 476.
- Bergström, S., J. Harlin and G. Lindström, 1992: Spillway design floods in Sweden. I: New guidelines. *Hydrological Sciences Journal*, 37(5):505-519.
- Bergström, S., B. Carlsson, M. Gardelin, G. Lindström, A. Pettersson and M. Rummukainen, 2001: Climate change impacts on runoff in Sweden – assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Climate Research*, 16(2):101-112.
- Beven, K. J., 1996: A discussion of distributed hydrological modelling. In: M.B. Abbott and J. Ch. Refsgaard, (eds) *Distributed Hydrological Modelling*, *Water Science and Technology Library*, Vol. 22, Kluwer, Dordrecht, 255-278.
- Biswas, A.K. (ed.), 1981: *Models for Water Quality Management.* McGraw-Hill, New York.
- Box, G.E.P. and G.M. Jenkins, 1970: *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, San Francisco, Holden-Day.
- Brun, E., P. David, M. Sudak and G. Brunot, 1992, A numerical Model to Simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting, *Journal of Glaciology*, 38(128), 13-22.
- Carroll, S.S., G.N. Day and T.R. Carroll, 1993: Incorporating airborne data into spatial model used to estimate snow water equivalent, *Geographic Information Systems and Water Resources, Journal of the American Water Resources Association*, March, pp. 259-264.
- Cigizoglu, H. K., 2003: Estimation, forecasting and extrapolation of river flows by artificial neural networks. *Hydrological Science Journal*, 48(3):349-361.
- d'Herbès, J.M. and C. Valentin, 1997: Land surface conditions of the Niamey region: ecological and hydrological implications. *Journal of Hydrology*, 188-189, 18-42.
- DeWeist, J.M., 1965: *Geohydrology.* John Wiley & Sons, 366 pp.
- DHI (Danish Hydraulic Institute), 1985: *Introduction to the SHE-European Hydrologic System*, Horsholm.
- Domenico, Patrick A. and W. Scgwartz Franklin, 1998: *Physical and Chemical Hydrogeology.* New York, NY: John Wiley & Sons Inc., 1998. ISBN: 0471597627.
- Donald J.R., E.D. Soulis, N. Kouwen, A. Pietroniro, 1995: A land cover-based snow cover representation for distributed hydrologic models. *Water Resources Research*, 31, No. 4: pp. 995-1009.
- Dooge, J.C.I., 1973: Linear theory of hydrologic systems. *Technical Bulletin No. 1468*, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, Washington, DC.
- Eagleson, P.S., 1970: *Dynamic Hydrology*, New York McGraw-Hill.
- Engman, E.T. and R.J. Gurney, 1991: *Remote-sensing in hydrology*, London, Chapman and Hill, 225 pp.
- Environment Agency, 2002: *Groundwater Resources Modelling*, Guidance Notes and Template Project Brief, R & D Guidance Notes W213, June 2002.
- Fetter, C. W., 1998: *Contaminant Hydrogeology.* 2nd ed. Upper Saddle, NJ, Prentice Hall, ISBN: 0137512155.
- Freeze, Alan R. and A. Cherry John, 1979: *Groundwater.* Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. ISBN: 0133653129.
- Hedstrom N.R. and J.W. Pomeroy, 1998: Measurements and modelling of snow interception in the boreal forest. *Hydrological Processes* 12(10-11):1611-1625.4.
- Hillel, Daniel, 1980: *Fundamentals of Soil Physics.* New York, NY, Academic Press, 1980. ISBN: 0123485606.
- Hipel, K.W., A.L. McLeod and W.C. Lennox, 1977: Advances in Box-Jenkins modelling. Part I: Model construction. *Water Resources Research*, 13:567-575.
- Hirsch, R.M. and J.R. Slack, 1984: A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence: *Water Resources Research*, pp. 727-782.
- Hughes, D.A., 2004a: Incorporating groundwater recharge and discharge functions into an existing monthly rainfall-runoff model. *Hydrological Science Journal*, 49(2):297-311.
- Hughes, D.A. (ed.), 2004b: SPATSIM, an integrating framework for ecological reserve determination and implementation. *Water Research Commission Report No. TT 245/04*, United States.
- Hughes, D.A. and W. Metzler, 1998: Assessment of three monthly rainfall-runoff models for estimating the water resource yield of semiarid catchments in Namibia, *Hydrological Science Journal*, 43(2):283-297.
- Hurst, H.E., 1951: Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions, American Society of Civil Engineers*, 16:770.

- Institute of Hydrology, 1999: *Flood Estimation Handbook (FEH)*: (in five volumes), Wallingford, Oxfordshire, United Kingdom.
- Keller, M., 1987: Auswertungskartierung mit Landsat-MSS Daten zur Erfassung oekologische Einflussgrößen in Gebirge, Remote-sensing Series, No. 10, PhD Thesis, University of Zurich.
- Kitanidis, P.K., 1992: Analysis of Macrodispersion through Volume-Averaging: Moment Equations, *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 6:5–25.
- Kite, G.W. and P. Droogers, 2000: Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *Journal of Hydrology*, 229(1–2):3–18.
- Krysanova, V., Müller-Wohlfeil D.L., and Becker A., 1998: Development and test of a spatially distributed hydrological/ water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling* 106:261–289.
- Krysanova, V., E. Wechsung, J. Arnold, R. Srinivasan and J. Williams, 2000: SWIM (Soil and Water Integrated Model). User Manual, PIK Report 69. Potsdam Institute for Climate Impact Research.
- Kundzewicz, Z. W. and A. Robson, 2004: Change detection in hydrological records – a review of the methodology. *Hydrological Science Journal*, 49(1):7–19.
- Leaf, C.F., and G.E. Brink, 1973: *Hydrologic simulation model of Colorado subalpine forest*, US Forest Service, Res.Pap. RM-107, Fort Collins, CO.
- Leavesley, G.H. and L.G. Stannard, 1990: Application of remotely sensed data on a distributed parameter watershed model, *Proceedings of the Workshop on Applications of Remote-sensing in Hydrology*, Editors: Kite, G.W. and Wankiewicz, A., National Hydrology Research Institute, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- Lindström, G., 1997: A simple automatic calibration routine for the HBV model. *Nordic Hydrology*, 28(3):153–168.
- Lindström, G. and J. Harlin, 1992: Spillway design floods in Sweden. II: Applications and sensitivity analysis. *Hydrological Science Journal*, 37(5):521–539.
- Lindström, G. and S. Bergström, 1992: Improving the HBV and PULSE-models by use of temperature anomalies. *Vanneti Norden*, 25(1):16–23.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. and Bergström, S., 1997: Development and test of the distributed HBV-96 model. *Journal of Hydrology*. 201:272–288.
- Maidment, D. R. 1992: *Handbook of Hydrology*. New York, McGraw-Hill.
- Mandelbrot, B.B. and J.R. Wallis, 1968: Noah, Joseph, and operational hydrology. *Water Resources Research*, 4(5):909–918. Available at the address http://www.math.yale.edu/mandelbrot/web_pdfs/051noahJoseph.pdf
- Marks, D., 1988: Climate, energy exchange and snowmelt on Emerald Lake watershed, Sierra Nevada, Unpublished PhD Dissertation, University of California, Santa Barbara, CA, 149 pp.
- Marsily, Ghislain De., 1986: *Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers*. Orlando, FL, Academic Press, 1986. ISBN: 0122089162.
- Martinez, J. and A. Rango, 1987: Interpretation and utilization of areal snow cover data from satellites, *Annual Glaciology*, 9:166–169.
- McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh, 1988: A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model: US Geological Survey, *Techniques of Water Resources Investigations*, Book 6, Chapter A1, 586 pp.
- Mejia, J.M., I. Rodriguez-Iturbe and D.R. Dawdy, 1972: Streamflow simulation, (2) The broken line process as a potential model for hydrologic simulation. *Water Resources Research*, 8(4):931–941.
- Miller, W.A., M.B. Shasby, W.G. Rhode and G.R. Johnson, 1982: *Developing in-place data bases by incorporating digital terrain data into the Landsat classification process*. Place Resource Inventories: principles and practices, Proc. Workshop, August 4–14, 1981, University of Maine, Orono, Sponsored by the American Society of Photogrammetry.
- Minns, A.W. and M.J. Hall, 1996: Artificial neural networks as rainfall-runoff models, *Hydrological Science Journal*, 41(3):399–417.
- Ostrem, G., T. Anderson and H. Odegaard, 1991: Operational use of satellite data for snow inventory and runoff forecast, *Satellite Hydrology*, *American Water Resources Association*, Minneapolis, MN, pp. 230–234.
- Pomeroy J.W. and E. Brun, 2001: Physical Properties of Snow. In *Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-covered Ecosystems*. H.G. Jones, J.W. Pomeroy, D.A. Walker and R.W. Hoham (eds). Cambridge University Press: Cambridge; pp. 45–126.
- Price, Michael, 1985: *Introducing Groundwater*. George Allen & Unwin: London, United Kingdom, 1985. 195 pp.
- Rango, A., 1993: Snow hydrology processes and remote-sensing, *Hydrological Processes*, 7:121–138.
- Rango, A., and van Katwijk. 1990: Development and testing of a snowmelt-runoff forecasting technique, *Water Resources Bulletin*, 26:135–144.
- Rango, A., V.V. Salomonson and J.L. Foster, 1977: Seasonal streamflow estimation in the Himalayan region employing meteorological satellite snow cover observations, *Water Resources Research*, 13:109–112.
- Refsgaard, J.C. and M.B. Abbott, 1996: The role of distributed modelling in water resources management. In: M.B. Abbott and J. Ch. Refsgaard, (eds), 1996: *Distributed Hydrological Modelling*, *Water Science and Technology Library*, Vol. 22, Kluwer, Dordrecht.
- Robson, A.J., T.A. Jones and D.W. Reed, 1998 A study of national trend and variation in United Kingdom floods. *International Journal of Climatology*, 18:165–182.
- Rodriguez-Iturbe, I. and B. Valdes, 1979: The geomorphologic structure of hydrologic response, *Water Resources Research*, 15(6):1409–1420.
- Rodriguez-Iturbe, I., J.M. Mejia and D.R. Dawdy, 1972: Streamflow simulation, (1) A new look at Markovian models, fractional Gaussian noise, and crossing theory. *Water Resources Research*, 8(4):921–930.
- Sahimi, Muhammad, 1995: *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1995. ISBN: 3527292608.
- Salas, J.D., 1992 Analysis and modelling of hydrological time series. Chapter 19 in: Maidment, D. R. (ed.) *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, 19–1 to 19–72.

- Scheidegger, Adrian, 1960: *The Physics of Flow through Porous Media*, University of Toronto Press.
- Shaw, E.M., 1994: *Hydrology in Practice*, third edition. London, Chapman and Hall.
- Singh, V.P., 1988: *Hydrologic Systems*. Rainfall-Runoff Modeling, Vol. I, Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- Sivapalan, M., K. Takeuchi, S. Franks, D. Schertzer, P.E. O'Connell, V.K. Gupta, J.J. McDonnell, J. W. Pomeroy, S. Uhlenbrook, E. Zehe and V. Lakshmi, 2003: IAHS Science Decade on Prediction in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Science Journal*, 48(6):857–880.
- SNA, 1995: *Climate, Lakes and Rivers*, The National Atlas of Sweden, Almqvist and Wiksell International, Stockholm.
- Storm, B. and A. Refsgaard, 1996: Distributed physically based modelling of the entire land phase of the hydrological cycle. In: M.B. Abbott and J. Ch. Refsgaard, (eds): *Distributed Hydrological Modelling*, Water Science and Technology Library, Vol. 22, Kluwer, Dordrecht.
- Sugawara, M., E. Ozaki, L. Watanabe and S. Katsuyama, 1974: *Tank Model and its Application to Bird Creek*, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. Research Note of the National Research Center for Disaster Prevention, Science and Technology Agency, Tokyo, Japan.
- Tayfur, G., 2002: Artificial neural networks for sheet sediment transport. *Hydrological Science Journal*, 47(6):879–892.
- Todd, David Keith, 1980: *Groundwater Hydrology*. New York, NY. John Wiley & Sons Inc. ISBN: 047187616X.
- Todini, E. and J.R. Wallis, 1978: A Real-time Rainfall Runoff Model for an On-line Flood Warning System. AGU Chapman conference on applications of kalman filtering theory and techniques to hydrology, hydraulics and water resources, Pittsburgh, Pennsylvania, 22–24 May 1978.
- Twedt, T. M., J.C. Schaake and E.L. Peck, 1977: National Weather Service extended streamflow prediction. Proceedings of the western snow conference, Albuquerque, New Mexico, 19–21 April 1977.
- US Army Corps of Engineers, 1960: *Runoff from Snowmelt*. Engineer Manual 1110-2-1406, US Department of the Army, Washington, DC.
- US Environmental Protection Agency, 1989: *EPA Groundwater Handbook*. Rockville, Maryland, Government Institutes, Inc. 212 pp.
- Valentijn R.N.P., R. Hoeben, N.E.C. Verhoest and E.P. De Troch, 2001: The importance of the spatial patterns of remotely sensed soil moisture in the improvement of discharge predictions for small-scale basins through data assimilation. *Journal of Hydrology*, 251(1–2):88–102.
- Walton, W., 1970: *Groundwater Resource Evaluation*, McGraw-Hill, 664 pp.
- World Meteorological Organization, 1986: *Intercomparison of Models of Snowmelt Runoff*. Operational Hydrology Report No. 23, WMO-No. 646, Geneva.
- , 1987: *Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting*. Operational Hydrology Report No. 7, WMO-No. 429, Geneva.
- , 1988: *Analysing Long Time Series of Hydrological Data with respect to climate variability and change*, WCAP-3, WMO/TD-No. 224, Geneva.
- , 1990: *Hydrological Models for Water-Resources System Design and Operation*. Operational Hydrology Report No. 34, Geneva.
- , 1991a: Simulated Real-time Intercomparison of Hydrological Models. Operational Hydrology Report No. 38, WMO-No. 779, Geneva.
- , 1991b: Hydrological Aspects of Accidental Pollution of Water Bodies. Operational Hydrology Report No. 37, WMO-No. 754, Geneva.
- , 1992a: *A study of current approaches to modelling of hydrological times series with respect to climatic variability and change* (G. Cavadias). World Climate Programme – Water, Project A2. WCASP–23 WMO/TD-No. 534, Geneva.
- , 1992b: *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture*. Operational Hydrology Report No. 35, WMO-No. 749, Geneva.
- , 1994: Applications of remote-sensing by satellite, radar and other methods to hydrology, Operational Hydrology Report No. 39, WMO-No. 804, Geneva.
- , 2000: *Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data*. World Climate Programme – Water (Z.W. Kundzewicz and A. Robson, eds) World Climate Programme Data and Monitoring, WCDMP-45, WMO/TD-No. 1013, Geneva.
- , 2003: *Integration and Coupling of Hydrological Models with Water Quality Models: Applications in Europe* (B. Arheimer and J. Olsson). WMO Technical Reports in Hydrology and Water Resources, No. 75. WMO/TD-No. 1174. Geneva.
- /WCRP, 1986. *Report of the Workshop on Global Large Scale Precipitation Datasets for the World Climate Research Programme*. WCP-111, WMO/TD-No. 94, WMO, Geneva, 45pp.
- Xiang, X. and E.A. Smith, 1997: Feasibility of simultaneous surface temperature-emissivity retrieval using SSM/I measurements from HAPEX-Sahel. *Journal of Hydrology*, 188–189, 330–360.
- Yue, S. and P. Pilon, 2004: A comparison of the power of the test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection. *Hydrological Science Journal*, 49(1):21–37.
- Yue, S., P. Pilon and B. Phimney, 2003: Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross-correlation. *Hydrological Science Journal*, 48(1):51–63.
- Yue, S., P. Pilon and G. Cavadias, 2002: Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259:254–271.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ

7.1 ВВЕДЕНИЕ В ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ [ГОМС J]

7.1.1 Предметный охват

Гидрологический прогноз — это предварительная оценка будущих характеристик гидрологического явления. Гидрологические прогнозы необходимы для эффективного управления водными ресурсами и смягчения последствий опасных природных явлений, таких как наводнения и засухи. Кроме того, растет их значение в поддержке комплексного управления водными ресурсами и уменьшения ущерба, вызванного наводнениями.

Описание и прогнозирование будущих характеристик водного режима может быть классифицировано по признаку заблаговременности установления наступления будущего события. Например, прогнозы таких различных гидрологических характеристик, как расходы, уровни воды и скорости течения, могут быть сделаны с начального срока прогноза до разных сроков в будущем. Технический регламент предусматривает следующую классификацию:

- a) краткосрочные гидрологические прогнозы, которые охватывают период до двух суток;
- b) среднесрочные гидрологические прогнозы, которые охватывают период от двух до десяти суток;
- c) долгосрочные гидрологические прогнозы, которые относятся к периоду заблаговременности более десяти суток.

В данном разделе рассматривается важность и необходимость создания комплексной прогностической программы, а в разделе 7.1.5 приведены вводные сведения об использовании коммуникационных технологий для сбора данных и распространения критически важных прогнозов и предупреждений среди их пользователей. В разделе 7.2 описаны требования к данным, используемым для гидрологического прогнозирования. В разделе 7.3 представлен обзор имеющихся различных методов прогнозирования — от простых индексных моделей до надежных гидрологических прогностических систем. Прогнозирование быстро развивающихся бурных паводков (см. раздел 7.4) и снеготаяния (см. раздел 7.6) освещено более детально в связи с необходимостью в руководящем материале по этим вопросам. И, наконец, прогнозы объема стока кратко рассматриваются в разделе 7.5. Рассмотрение гидрологических прогнозов в этой главе будет ограничено вопросами прогнозирования количеств воды.

7.1.2 Выпуск гидрологических прогнозов

Служба гидрологических прогнозов состоит из обученных прогнозистов, работающих как с данными, поступающими в режиме реального времени с радиолокаторов и спутников, так и с рядами исторических данных, а также с данными наблюдений *in situ*. Они используют различные технические средства и программное обеспечение, гидрологические модели или моделирующие системы, метеорологические модели или входные данные и результаты моделирования, компьютерное оборудование. Существует много способов формирования службы гидрологических прогнозов. Однако существует минимальное число факторов, которые необходимы для обеспечения бесперебойного предоставления обслуживания, направленного на удовлетворение потребностей разнопланового сообщества пользователей.

Концепция построения службы гидрологических прогнозов определяет, каким образом оперативная прогностическая служба будет функционировать на ежедневной основе, а также в условиях наступления наводнения. Она охватывает следующие вопросы:

- a) предназначение и правовые полномочия организации;
- b) пользователи и требуемые виды продукции или обслуживания;
- c) предельные сроки передачи информации;
- d) организация службы гидрологических прогнозов;
- e) гидрометеорологическая сеть и организация ее функционирования;
- f) порядок взаимодействия гидролога с бюро метеорологических прогнозов;
- g) средства связи и программное обеспечение, используемые как для получения данных и информации, так и для передачи прогнозов;
- h) порядок выпуска прогностической продукции;
- i) методики и типовые оперативные процедуры, которые необходимо соблюдать в целях обеспечения использования наиболее эффективных методов работы в обычных и чрезвычайных условиях;
- j) пропаганда службы гидрологических прогнозов посредством просвещения и обучения политиков, специалистов в области управления чрезвычайными ситуациями и широких слоев населения.

Образцы продукции должны быть легко доступными для потенциальных заказчиков.

Целевое назначение и правовые полномочия службы гидрологических прогнозов должны быть четко определены. Важно, чтобы законодательно был установлен только один официальный источник прогнозов и предупреждений. Множество источников прогностической информации может привести к противоречию, что, в свою очередь, может вызвать путаницу и уменьшить возможность принятия эффективных мер реагирования.

Основные пользователи предупреждений — это национальные, региональные и местные организации по реагированию на чрезвычайные ситуации или гражданской обороны, средства массовой информации, сельскохозяйственные и промышленные предприятия, гидроэнергетика, органы по регулированию паводков, водный транспорт, муниципальные водохозяйственные организации и население. Потребности в гидрологических данных, прогностической продукции и предупреждениях меняются в зависимости от целевого сообщества пользователей. Для гидролога важно понимать требования пользователей, чтобы данные и прогностическая продукция могли быть подготовлены сообразно их потребностям. Существует немало секторов национальной экономики, например транспорт, управление в чрезвычайных ситуациях, сельское хозяйство, энергетика и водоснабжение, которые имеют особые потребности в такой информации. Признание этих потребностей и предоставление данных, прогнозов и продукции с целью их удовлетворения обеспечивает максимально полезный эффект для общества от службы гидрологических прогнозов. Опытные пользователи, такие как организации гидроэлектроэнергетики, нуждаются в гидрометеорологических данных, прогнозах, гидрографах притока и анализах для содействия выработке электроэнергии, в то время как действия по управлению в чрезвычайных ситуациях требуют более простых прогнозов и предупреждений, но повышенной срочности.

Сеть, включающая водомерные и осадкомерные посты, а также соответствующую метеорологическую сеть, должна быть организована с учетом наличия данных из различных источников, таких как радиолокационная сеть и спутниковая продукция. Однако непрерывное наличие подобной продукции должно быть обеспечено еще до того, как она будет использоваться национальными службами гидрологических прогнозов на постоянной основе. Тесное сотрудничество между метеорологическими и гидрологическими прогностическими службами играет очень важную роль. Процедура или организация системы получения данных и прогнозов, точно также, как и аналитической информации, должна служить исходной основой для гидрологических прогнозов и определена с концептуальной точки зрения. Коммуникационное оборудование и программное обеспечение, используемые

в системах прогнозирования паводков, зависят от наличия инфраструктуры в данной стране. Однако современные коммуникационные системы, например спутниковые системы и сеть Интернет, обеспечивают весьма широкий выбор и должны использоваться соответствующим образом.

Важно определиться с требуемым штатом сотрудников, например количеством техников и специалистов, необходимым для работы центра в повседневном режиме и в условиях чрезвычайной ситуации. Должны быть также обозначены их задачи и обязанности, график работы, а также потребности прогнозистов в непрерывной профессиональной подготовке.

Гидрологические прогностические программы должны быть надежными, а при их разработке должна быть предусмотрена их применимость во время наиболее сильных паводков. Эти программы наиболее эффективны при прогнозировании интенсивных, широко-масштабных и/или быстроразвивающихся паводков. Обычно во время экстремальных ситуаций, например паводков, нагрузка на имеющиеся ресурсы возрастает. Работа прогностического центра во время прохождения экстремальных явлений должна быть хорошо организована. В таких случаях обычно наблюдается увеличение потока данных и кадровых потребностей, поскольку должно быть подготовлено больше срочных прогнозов для большего числа пользователей. Нередко приходится увеличивать число рабочих часов, чтобы удовлетворять повышенные потребности в прогностическом обслуживании.

В повседневных условиях сотрудники гидрологической прогностической службы собирают данные и информацию о контроле качества данных, получают и анализируют метеорологические прогнозы, прогоняют гидрологические модели и прогностические системы, оценивают текущую и ожидаемую гидрологическую обстановку и выпускают прогностическую продукцию, чтобы разослать ее пользователям. В часы, свободные от прогнозирования, гидрологи обновляют данные, такие как кривые расходов, оценивают эксплуатационные характеристики, выполняют рекалибровку моделей и ищут способы повышения точности и своевременности будущих прогнозов.

Никогда невозможно добиться постоянной 100-процентной надежности аппаратного оборудования, программного обеспечения и/или непрерывного электропитания даже с надежными программами технического обслуживания. Поэтому служба гидрологических прогнозов должна иметь резервные системы для всех компонентов: системы сбора данных; системы прогнозирования, включая дублирование оборудования, программных средств и данных; системы распространения прогнозов и других коммуникационных систем;

источников бесперебойного питания и резервных генераторов; а также обеспечение запасного пункта для работы на случай причинения ущерба тому месту, где находится сам прогностический центр.

Ключевым условием создания надежного оперативного прогностического центра является организация эффективной программы технического обслуживания. К сожалению, это довольно дорогостоящее мероприятие, в особенности, если наблюдательная сеть широко разбросана и является труднодоступной. Все аппаратное оборудование и программное обеспечение должны периодически обслуживаться, иначе система откажет в самый необходимый момент. В некоторых странах в штат гидрологической прогностической службы входит системный администратор, который отвечает за обслуживание коммуникационных средств и прогностической системы.

7.1.3 Комплексные системы гидрологического прогнозирования

В настоящее время гидрологические прогностические системы являются доступными и обладают большой мощностью. Степень успеха использования этих систем в основном зависит от уровня подготовки гидрологов, которые с ними работают. Данные системы способны выдавать как прогнозы паводков, которые сформируются в течение нескольких часов, так и сезонные вероятностные прогнозы с заблаговременностью в несколько месяцев для более крупных речных водосборов.

Для создания эффективной программы гидрологического прогнозирования и предупреждений для подвергающегося риску населения необходимы совокупность метеорологических и гидрологических данных,

средства прогнозирования и подготовленные прогнозисты. Такая программа должна предоставлять отдельным общинам в пойме реки необходимое для принятия решений время. В случае прогнозов паводков заблаговременность может стать решающим фактором для уменьшения ущерба и спасения жизней. Прогнозы должны быть достаточно точными, чтобы со стороны населения и пользователей была уверенность, что в случае предупреждения они успеют принять эффективные меры. Если прогнозы неточны, доверие к ним будет подорвано и не последует адекватного реагирования.

Опыт и уроки прошлого показали, что комплексная система гидрологического прогнозирования и реагирования (см. рисунок II.7.1) включает следующие элементы, которые должны быть связаны в одно целое для обеспечения уменьшения потерь от паводков:

- a) сбор и передача данных;
- b) гидрологическое прогнозирование и формирование прогностической продукции;
- c) доведение прогнозов до пользователей;
- d) принятие решений и их поддержка;
- e) действия, предпринимаемые пользователями.

Взаимодействие технологических компонентов интегрированной целостной системы гидрологического прогнозирования может быть представлено как цепь, состоящая из множества звеньев. Каждое звено должно быть полностью функциональным, чтобы приносить пользу сообществу пользователей и населению, которые подвергаются опасности. Как и в случае звеньев цепи, если один элемент не будет работать должным образом, будет нарушена вся система. Другими словами, если подготовлен точный прогноз паводка, но он не доведен до сведения подвергающегося опасности населения, или не было возможности предпринять превентивные меры, то прогностическая система не служит заданной цели.



Рисунок II.7.1. Интегрированная система прогнозирования паводков, предупреждения и реагирования при комплексном управлении водными ресурсами: критическая цепь событий и действий

7.1.4 **Неопределенность и вероятностные прогнозы**

В общем случае основная цель гидрологического прогнозирования — обеспечить максимально возможную заблаговременность прогноза с достаточной точностью, чтобы пользователи могли принять соответствующие меры для уменьшения ущерба или оптимизировать решения в области водохозяйственной деятельности. Все прогнозы содержат неопределенность, и одним из наиболее успешных способов ее преодоления является использование ансамблей. Неопределенность гидрологического прогноза берет начало в метеорологии. Учитывая, что все мезомасштабные модели атмосферы стремятся смоделировать весьма хаотическую атмосферу, метеорологические условия уже в течение нескольких лет рассматриваются как основной источник неопределенности. Более того, параметры гидрологической модели и механика модели также вносят свой вклад в соответствующую неопределенность или ошибку в прогнозах. Обычно главным лимитирующим фактором является адекватность данных. Если для составления прогнозов используются только данные гидрологических наблюдений, то заблаговременность может быть такой незначительной, что полезность прогнозов для потребителей будет низкой. Благодаря стыковке гидрологических моделей с метеорологическими прогнозами, подготовленными метеорологами с использованием глобальных и региональных численных моделей прогнозов погоды и с учетом местных климатических условий, прогнозы стока могут распространяться в дальнейшем на срок от нескольких дней до недель. Хотя стыковка моделей может действительно увеличить заблаговременность прогноза для пользователей, она также увеличивает неопределенность прогнозов.

Климатическое или сезонное прогнозирование в настоящее время становится полезным инструментом в сфере управления водными ресурсами и для решения задач, связанных с уменьшением факторов риска наводнений. Экстремальные наводнения связаны со значительными изменениями в атмосфере и особенностями циркуляции в океане; достаточно один раз определить эти особенности, чтобы спрогнозировать возможность меньшей или большей степени штормовой активности. Эта информация тогда может использоваться для совершенствования мер реагирования на чрезвычайные ситуации и увеличения степени готовности прогностических организаций.

Когда вероятность экстремального наводнения по прогнозу выше, чем обычно, могут быть приняты определенные меры в преддверии чрезвычайной ситуации, например создание защитных дамб из мешков с песком, организация запасов еды и питьевой

воды, вывоз со складов дорогостоящих запасов зерна и товаров из подверженного опасности наводнения района. В это время также необходимо обеспечить информирование населения об угрозе наводнения, обращая особое внимание на те действия, которые необходимо предпринять населению и другим лицам в связи с этим, и провести учения по действиям при чрезвычайной ситуации для проверки степени готовности к чрезвычайной ситуации. В некоторых случаях могут потребоваться экстренные меры, например возведение временных защитных барьеров. Разработки по повышению мощности вычислительных ресурсов за последние годы позволили увеличить пространственное разрешение глобальных и региональных атмосферных моделей. Локальные негидростатические модели могут быть успешно приведены к масштабу примерно 1 км. Кроме того, процессы более мелкого масштаба, например конвекция и расширение орографии, моделировались более эффективно.

Вероятностное прогнозирование не следует путать с ошибкой прогноза. Последняя является внутренним атрибутом модели и представляет собой погрешность, обусловленную неадекватностью модели и ошибкой данных. Возможно, наилучшим способом различить их является представление вероятностного прогнозирования как выражение диапазона выходных данных, возможных для тех условий, которые могут возникнуть до даты, на которую выпускается прогноз, в то время как ошибка прогноза является полностью нежелательной характерной особенностью недостатков, связанных с состоянием развития прогностической науки и имеющихся данных.

Основной механизм для того, чтобы напрямую включить неопределенность, состоит в том, чтобы нарушить начальные условия нелинейных уравнений в частных производных, описывающих атмосферу, с использованием подходов, описывающих мезомасштабные конвективные системы. Однако большинство используемых ныне методов являются неоптимальными, и по-прежнему приходится полагаться на разумный выбор прогнозиста. Для отражения и описания неопределенности прогноза широко используется ансамблевый фильтр Калмана. В последние годы Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (<http://www.ecmwf.int>) и другие международные учреждения исследовали использование ансамблей, отражающих поведение мезомасштабных конвективных систем. В 2005 г. было начато выполнение крупномасштабного эксперимента по сравнению методов ансамблевого гидрологического прогнозирования. Хотя этот подход, несомненно, имеет большое будущее, он все еще требует проверки и большой работы по разработке методов передачи неопределенности через сложные моделирующие системы.

7.1.5 **Распространение прогнозов и предупреждений**

С течением времени прогнозы утрачивают свою ценность. Чем быстрее данные и прогнозы могут быть переданы пользователям, тем больше времени имеется для принятия мер, что позволяет спасти жизни, уменьшить материальный ущерб и повысить эффективность работы водохозяйственных сооружений. Распространение прогнозов и предупреждений среди населения общин и деревень, подверженных риску затопления, нередко является слабым звеном в непрерывной цепи. Значительное развитие коммуникационных технологий способствует быстрой передаче данных, прогнозов и информации на большие расстояния и в удаленные районы.

Предоставляемую гидрологическую продукцию служб прогнозов можно разделить на стандартные ежесуточные прогнозы и нерегулярные срочные прогнозы. Многие пользователи требуют регулярной передачи данных и прогнозов на ежедневной основе в форме гидрологического бюллетеня. Информация преимущественно дается по основным рекам, водохранилищам и другим водным объектам регионального значения. Ежедневные бюллетени отличаются по содержанию и часто включают информацию о текущих значениях и изменениях уровней, расходов воды, общей тенденции в изменениях этих характеристик; температуре воды; данных с водохранилищ, таких как наполнение и сброс воды, осадки, гидрологические прогнозы и сведения о ледовой обстановке. На рисунке II.7.2 приводится пример такого бюллетеня.

Многие стандартные гидрологические прогнозы могут выпускаться на основе потребностей пользователей. Прогнозы запасов воды и сводные данные о стоке могут выпускаться еженедельно и ежемесячно. Эти сводки часто предоставляют графические и количественные данные по основным пунктам на речных бассейнах, которые могут включать средне- и долгосрочные прогнозы с заблаговременностью в недели, месяцы или сезоны. Регулярная гидрологическая продукция должна распространяться настолько широко, насколько это возможно, поскольку в этом случае пользу из данных и прогнозов смогут извлечь многие группы пользователей. Открытый доступ к данным и прогнозам для многих пользователей повышает ценность прогностического обслуживания и способствует формированию контингента заказчиков, что необходимо для продолжения прогностической деятельности в будущем.

Сеть Интернет — это лучший способ распространения информации. Хотя процесс передачи информации ограничивается шириной полосы пропускания во многих развивающихся странах, Интернет

используется все чаще и становится все доступнее. Гидрологические прогностические системы могут использовать этот канал коммуникации в своих стратегиях распространения гидрологической продукции. Другие способы распространения информации — это использование средств массовой информации, непрерывного радиовещания и факсимильной связи.

Составление и распространение прогнозов и предупреждений, касающихся среднесрочных экстремальных событий, требует быстрого сбора исходных данных. Кроме того, необходимо, чтобы прогнозы были составлены и переданы населению, проживающему в зоне риска, с заблаговременностью, достаточной для начала принятия мер по минимизации негативного воздействия. Для того чтобы донести информацию до подвергающегося опасности населения, гидрологические прогностические центры должны изучить возможности всех доступных каналов связи. Чаще всего применяемые средства массовой информации — это линии прямого вещания, спутниковая трансляция, радио и проводная связь с центрами по чрезвычайным ситуациям, а также радио- и телевизионные станции.

В чрезвычайных условиях, например при наводнениях, предупреждения должны ясно определять тип гидрологической опасности, зону прогнозируемого события, а именно соответствующие реки и водотоки, ожидаемые масштабы бедствия, например максимальный уровень затопления в критических местах, прогнозируемый срок наступления максимума, и, по возможности, ожидаемые сроки падения водности реки ниже уровня предупреждения или опасного уровня. По возможности, должны предоставляться и дополнительные подробности, например, какая часть объектов инфраструктуры затрагивается данным событием. Подобная информация сообщает подразделениям служб по чрезвычайным ситуациям те участки, где необходимо принять срочные меры по эвакуации населения и перекрытию дорог. По мере поступления новых данных и информации предупреждения о паводках должны обновляться и передаваться в СМИ и должностным лицам, занимающимся вопросами реагирования на чрезвычайные ситуации.

Успехи, достигнутые в объединении гидрологических моделей с пополняемыми базами географических данных, привели к разработке и внедрению визуализированной продукции гидрологического прогнозирования высокого разрешения. Этот новый класс гидрологической продукции показывает зону затопления, сгенерированную моделями с использованием оцифрованных с высоким разрешением данных о рельефе местности. Привязывая эти данные к высотным отметкам русел рек, спрогнозированным гидрологической моделью, можно совместить площадь затопления с детальными цифровыми картами с нанесенной на

HYDROLOGINEN KUUKAUSITIEDOTE

MONTHLY HYDROLOGICAL REPORT

Elokuu 2006 August

SYKE

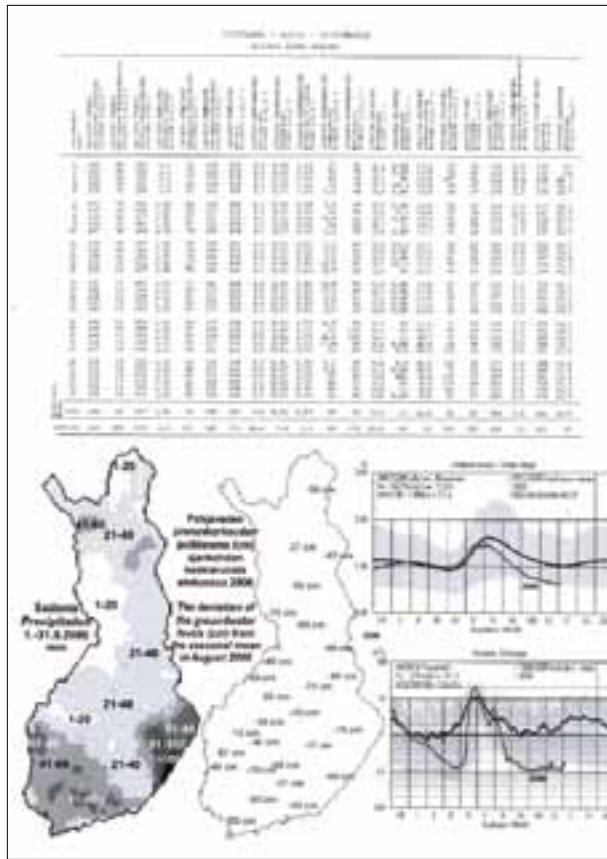
Suomen ympäristökeskus

Yhteenveto
 Kuukauden aikana on ollut runsaasti sateita ja lämpötilat ovat olleet korkeita. Sateita on tullut erityisesti loppupuolella kuukautta. Lämpötilat ovat olleet yleensä korkeita, erityisesti yöllä. Tällöin on ollut mahdollisuus sateiden muodostumiseen. Sateiden määrä on ollut yleensä runsas, mutta on ollut vaihtelevaa. Lämpötilat ovat olleet yleensä korkeita, erityisesti yöllä. Tällöin on ollut mahdollisuus sateiden muodostumiseen. Sateiden määrä on ollut yleensä runsas, mutta on ollut vaihtelevaa.

Suomen ympäristökeskus
 Suomen ympäristökeskus on valtion tutkimus- ja tiedonvälitysorganisaatio. Sen tehtävänä on seurata ympäristön tilaa ja kehitystä, tehdä tutkimusta ja antaa tietoa ympäristön tilasta ja sen kehittymisestä. Suomen ympäristökeskus on osa Ympäristöministeriötä.

Yhteystiedot
 Suomen ympäristökeskus
 PL 14, 000140 Helsinki
 Puhelin: +358 (0)9 2535 1000
 Faksi: +358 (0)9 2535 1001
 Sähköposti: ymp@ympy.fi
 Internet: ympy.fi

Suomen ympäristökeskus		Suomen ympäristökeskus	
Suomen ympäristökeskus		Suomen ympäristökeskus	
1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16
17	18	19	20
21	22	23	24
25	26	27	28
29	30	31	32
33	34	35	36
37	38	39	40
41	42	43	44
45	46	47	48
49	50	51	52
53	54	55	56
57	58	59	60
61	62	63	64
65	66	67	68
69	70	71	72
73	74	75	76
77	78	79	80
81	82	83	84
85	86	87	88
89	90	91	92
93	94	95	96
97	98	99	100



SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS

Suomen ympäristökeskus

Suomen ympäristökeskus		Suomen ympäristökeskus	
Suomen ympäristökeskus		Suomen ympäristökeskus	
1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16
17	18	19	20
21	22	23	24
25	26	27	28
29	30	31	32
33	34	35	36
37	38	39	40
41	42	43	44
45	46	47	48
49	50	51	52
53	54	55	56
57	58	59	60
61	62	63	64
65	66	67	68
69	70	71	72
73	74	75	76
77	78	79	80
81	82	83	84
85	86	87	88
89	90	91	92
93	94	95	96
97	98	99	100

Рисунок II.7.2. Пример гидрологического бюллетеня (Институт окружающей среды Финляндии)

них инфраструктурой и получить изображение того, как спрогнозированное наводнение будет воздействовать на данную местность. На рисунке II.7.3 представлен пример продукции с такой картой зон затопления.

7.1.6 Средства поддержки принятия решений

Организации, отвечающие за управление водными ресурсами, применяют средства поддержки принятия решений, позволяющие управлять функционированием инфраструктуры. В сфере управления водными ресурсами прогнозы требуются для планирования эффективного использования водных ресурсов в диапазоне от выработки гидроэлектроэнергии до водоснабжения и ирригации. Принятые специалистами водохозяйственного сектора меры могут иметь значительные негативные последствия, если не была принята во внимание водообеспеченность в будущем. При наличии гидрологических прогнозов специалисты водохозяйственного сектора могут эксплуатировать системы водоснабжения таким образом, чтобы лучше удовлетворять потребности в воде и свести к минимуму возможность возникновения конфликтов.

Убытки от наводнений могут быть уменьшены за счет инвестиций сообществ и стран в обеспечение готовности к наводнениям и планирование деятельности по реагированию на чрезвычайные ситуации. Службы по чрезвычайным ситуациям ответственны за составление планов соответствующих мер реагирования на наводнения, которые определяют роль различных государственных, областных и местных организаций

в деле защиты жизни людей и их собственности. Звеньями этой непрерывной цепи являются такие виды деятельности, как организация маршрутов эвакуации, обучение населения, которому угрожает опасность наводнения, разработка процедур и тренировка персонала по заблаговременному реагированию на случай наводнения.

Даже точный прогноз наводнения теряет свою ценность, если не будут предприняты определенные шаги по уменьшению убытков. В рамках комплексного процесса данные и прогнозы должны быть подготовлены как можно быстрее, чтобы дать пользователям время для принятия мер. В случае наводнения, особенно быстроразвивающегося бурного паводка, время является критическим фактором. Важно понимать потребности пользователей и то, как прогнозы используются. Пользователи прогнозов могут сильно различаться друг от друга — это могут быть и федеральные учреждения по чрезвычайным ситуациям, и местные правительства, у которых могут быть разные функции и требования к мерам по реагированию и уменьшению материального ущерба. Пользователи должны понимать прогнозы или предупреждения для принятия адекватных мер.

7.1.7 Сотрудничество с национальной метеорологической службой

Несмотря на то, что в немногих странах существует объединенная метеорологическая и гидрологическая служба, в большинстве случаев метеорологические службы и органы управления водохозяйственной деятельностью разделены. Фактически они редко



Рисунок II.7.3. Карта прогноза зон затопления в результате наводнения, вызванного ураганом *Митч* в Тегусигальпе, Гондурас

существуют в одном правительственном департаменте или министерстве. Обеспечение точными прогнозами погоды, особенно, что касается случаев выпадения сильных осадков, является крайне необходимым для прогнозирования и предупреждения паводков. В связи с этим важно развивать тесное сотрудничество между национальной метеорологической службой и службой прогнозирования паводков.

Общие метеорологические прогнозы малопригодны для гидрологов. Поэтому первым шагом в развитии сотрудничества должно стать принятие решения о том, в каких случаях можно повысить ценность метеорологической информации и как ее структурировать под нужды гидрологии. Это будет иметь большое значение для повышения точности информации о количественных прогнозах осадков — пространственном и временном распределении. Стандартными видами прогнозов являются:

- а) регулярные ежедневные прогнозы осадков, температуры и погоды на 24–48 часов и прогнозируемый период на последующие примерно 3–5 суток;
- б) прогнозы отдельных явлений, в частности прогнозы и предупреждения о таких опасных природных явлениях, как сильные осадки, снегопады и штормовые ветры, которые имеют гидрологические последствия. Они должны предоставлять качественную информацию о количественных характеристиках и пространственном распространении с заблаговременностью 12–36 часов;
- в) ориентировочные прогнозы на недели или месяцы, либо на отдельные сезоны. Они полезны для целей планирования, особенно в отношении засухи или прекращения засушливых условий. Некоторые национальные метеорологические службы, например Австралии, Папуа-Новой Гвинеи и Южной Африки, предоставляют прогнозы активности Эль-Ниньо, которое, как известно, непосредственно влияет на режимы метеорологических условий.

Национальная метеорологическая служба и гидрологическое учреждение должны согласовать форму и содержание прогнозов и предупреждений. Это достигается постепенно эволюционным образом или в ходе итеративного процесса.

Полезно также обеспечивать гидрологическое учреждение и другой продукцией метеорологической службы. Самая распространенная продукция — это спутниковые изображения и данные метеорологических радиолокаторов об осадках. Информация, передаваемая по специальным каналам передачи данных, будет более надежной, чем информация, передаваемая по открытым служебным сетям или выкладываемая на Интернет-сайтах. Организация прямой передачи данных национальной метеорологической службой также будет обеспечивать их автоматическое обновление,

к примеру, каждые 3–6 часов для спутниковых изображений и каждые 5–10 минут для радиолокационных данных. Применяя спутниковую и радиолокационную информацию, сотрудники гидрологического учреждения могут самостоятельно оценить текущие и ближайшие погодные условия. Очень важно, чтобы сотрудники были хорошо для этого подготовлены; национальная метеорологическая служба играет важную роль в проведении необходимой подготовки посредством организации вводных курсов и курсов повышения квалификации.

Вышеупомянутые организационные меры и средства должны быть предусмотрены официальным рабочим соглашением, определяющим уровни обслуживания, которые будут достигнуты благодаря своевременной доставке и точности прогнозов. Это рабочее соглашение должно также включать в себя стоимость предоставляемого обслуживания. Это позволит обеим сторонам определять экономические затраты и выгоды, связанные с предоставлением обслуживания, и значение обслуживания в управлении последствиями.

7.2 ТРЕБОВАНИЯ К ДАННЫМ, ИСПОЛЬЗУЕМЫМ ДЛЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

7.2.1 Общие положения

Требования к данным для гидрологического прогнозирования зависят от многих факторов:

- а) цель и вид прогноза;
- д) характеристики бассейна;
- б) прогностическая модель;
- в) желательная степень точности прогноза;
- е) экономические ограничения прогностической системы.

Требования к данным меняются в широких пределах в зависимости от цели прогноза. Эксплуатация водохранилища требует прогнозов притока воды за короткие интервалы времени и объема воды, который, вероятно, поступит в водохранилище в результате паводка, вызванного ливневыми осадками. Прогнозы уровня воды на крупных равнинных реках могут быть без труда выполнены на основе данных измерений уровня воды на водомерных постах, расположенных выше по течению. В связи с этим в качестве исходных данных в таких случаях будут использоваться уровни воды на двух или более постах на главной реке или ее притоках. Однако на малых горных реках, кроме измерений уровня и расхода воды через относительно короткие интервалы, практически не обойтись без данных об осадках.

В последующих разделах широко рассматривается вопрос о том, какой вид прогностической модели должен использоваться. Требования, предъявляемые к исходным данным при калибровке модели и при ее использовании для прогнозирования, сильно меняются от модели к модели. Например, в случае простой корреляционной модели, которая применима для крупных рек, достаточными данными будут уровни воды на двух или более постах. Однако для использования комплексной модели бассейна потребуется ряд других исходных данных.

Несмотря на то, что точность прогнозов имеет первостепенное значение, из-за экономических ограничений, относительной важности и цели прогнозирования вполне допустима и меньшая степень точности. В таких ситуациях может быть выбрана модель с менее жесткими требованиями к данным. Тем не менее для прогнозов в критических точках, например вблизи густозаселенных территорий или других крайне уязвимых площадей, большая точность имеет первостепенное значение.

Помимо типа данных, используемых в прогностических целях, не менее важны сведения о периодичности данных, длине ряда наблюдений и качестве данных, что необходимо должным образом принять во внимание при планировании любой системы прогнозирования паводков. Особенно важно исключить систематические ошибки между данными, которые использовались при разработке прогностической процедуры или при выполнении калибровки, и данными, использованными для оперативного прогнозирования.

В общем и целом количество имеющихся данных, необходимых для выпуска прогнозов, и их качество повышаются. Количество автоматизированных постов и радиолокаторов увеличивается, а качество новых спутников и алгоритмов оценки осадков способствует получению более качественных входных данных для методов и систем гидрологического прогнозирования. Ключевой задачей в достижении надежности данных в гидрологических прогнозах является техническое обслуживание платформ сбора данных и коммуникационных систем.

7.2.2 **Данные, необходимые для создания прогностической системы**

Надежные гидрологические прогнозы нельзя выпускать без данных. Необходимые для гидрологического прогнозирования данные, как это рассматривается в предыдущих главах, в общих чертах можно разбить на следующие группы:

- a) физико-географические;
- b) гидрологические;
- c) гидрометеорологические.

Данные географических информационных систем (ГИС) требуются как для калибровки модели, так и для визуализации состояний модели и результатов моделирования. Данные включают различную информацию о подстилающей поверхности, такую как вид почвы, геологическое строение, растительность и высотные отметки цифровых моделей рельефа. Эффективность системы гидрологического прогнозирования будет зависеть от надежности и количества данных наблюдений и данных ГИС, применяемых для определения параметров.

Ключевыми для гидрологического прогнозирования являются гидрологические данные, отражающие уровни воды, например расходы воды, уровень подземных вод, качество воды и расход наносов, а также гидрометеорологические данные, характеризующие испарение, температуру, влажность, выпадение дождевых осадков и другие формы осадков, например снег и град. Некоторые или все из перечисленных выше данных могут быть необходимы или для разработки модели, или для ее оперативного использования (в зависимости от модели). В последние десять лет базы данных и программное обеспечение для их обработки объединяются с гидрологическими моделями с целью создания гидрологических прогностических систем, использующих гидрологические и/или метеорологические данные и обрабатывающих данные для их использования в гидрологических моделях. Выходные данные таких моделей затем используются гидрологами для прогнозирования состояния речного стока, включая паводки и засухи.

Достаточная гидрометеорологическая сеть — важнейшее условие для прогнозирования паводков. В большинстве случаев оперативная деятельность наблюдательной сети является самым слабым звеном в рамках комплексной системы. В частности, для прогнозирования паводков и засух необходимо иметь, по крайней мере, адекватные данные водомерных постов об осадках и стоке. Если одним из факторов является снеготаяние, измерения водного эквивалента выпавшего снега, протяженность снежного покрова и температура воздуха также важны. Поэтому при формировании системы гидрологических прогнозов важно задать следующие вопросы:

- a) Достаточны ли сети осадкомеров и водомерных постов для выборочных наблюдений за интенсивностью и пространственным распределением осадков и стока для данного речного бассейна?
- b) Насколько правильно функционируют водомерные посты и обеспечивают ли они точные данные об уровне и расходе воды?
- c) Надежно ли осуществляется передача данных с наблюдательных постов в центр прогнозов?

- d) Как часто производятся наблюдения и сколько требуется времени для передачи результатов наблюдений в центр прогнозов?
- e) Доступны ли данные для пользователей, которым они необходимы для принятия решений?
- f) Архивируются ли данные для использования в будущем?
- g) Собираются ли данные в соответствии с общепринятыми стандартами; обслуживается и калибруется ли оборудование должным образом и осуществляется ли контроль над качеством данных?

Первый шаг — обследование существующей сети. Необходимо подготовить перечень местоположений имеющихся станций наблюдений, параметров, датчиков, самописцев, телеметрической аппаратуры и других соответствующих данных и представить их в графической форме. В пределах низменных водосборов нужно внести в реестр водомерные посты на соседних водосборах, поскольку данные наблюдений с этих постов могут быть очень полезны. Необходимо провести оценку притоков бассейнов со схожими гидрологическими и метеорологическими условиями. Основная задача — с наибольшей выгодой использовать существующие сети станций гидрометеорологических наблюдений, которые эксплуатируются различными государственными учреждениями и частным сектором и существенны для данного бассейна. В определенном отношении предпочтительнее, чтобы сеть наблюдений использовалась для решения различных задач, поскольку это может позволить расширить финансовую поддержку сети.

Достаточность сетей наблюдений может быть определена в зависимости от потребностей в сфере прогнозирования, и следует обратить внимание на необходимые изменения. Они могут предусматривать установку новых водомерных постов, дождемеров и других измерительных приборов в верховьях рек или дополнительного телеметрического оборудования. В некоторых случаях местоположение постов наблюдений не позволяет осуществлять измерения стока воды или получать другие данные в экстремальных условиях. Могут потребоваться структурные изменения. Для поддержания и функционирования сети могут потребоваться межведомственные соглашения.

Существует множество источников таких данных — от наблюдений *in situ*, выполняемых вручную, до платформ автоматизированного сбора данных и систем дистанционного зондирования. Автоматизированные системы наблюдений состоят из метеорологических и гидрологических датчиков, радиопередающего устройства или компьютера — регистратора данных — и линии связи для передачи данных со спутника или приемного центра для получения и обработки данных для их дальнейшего использования. Существует много

типов автоматизированных систем гидрометеорологических данных, в которых применяются коммуникационные технологии на основе линий связи в пределах прямой видимости, спутниковой или метеорной связи. Высокоскоростная передача гидрометеорологической информации крайне важна для заинтересованных сторон и пользователей из водохозяйственного сектора, поскольку в этом случае информация может быть получена незамедлительно многими пользователями через спутниковую связь и/или Интернет. Радиолокатор — это широко распространенное и мощное, но до сих пор дорогостоящее оборудование, используемое для оценки осадков на больших территориях. Использование геостационарных и полярно-орбитальных спутников для получения больших объемов метеорологической и гидрологической информации быстро развивается. Данные дистанционного зондирования в настоящее время могут использоваться для оценки осадков, площади снежного покрова, типа растительности, вида землепользования, эвапотранспирации и влажности почвы, а также для определения границ затопляемых территорий.

Информация об оборудовании, которое используется для сбора, обработки, хранения и распространения гидрологических и связанных с ними данных, содержится в томе I настоящего Руководства.

7.2.3 **Данные, необходимые для оперативных целей**

Основными параметрами, определяющими сток воды и гидрологические процессы, являются начальные условия и будущие факторы. Начальные условия — это условия, сложившиеся в момент выпуска прогноза, и которые могут быть вычислены или оценены на основе текущих или прошлых гидрометеорологических данных. Будущие факторы — это факторы, влияющие на прогнозируемую переменную после выпуска прогноза. Можно утверждать, что самые серьезные проблемы при управлении ресурсами возникают в экстремальных условиях: во времени — в ходе паводков и засух; и в пространстве — в засушливых, полусушливых и тропических зонах и в прибрежных районах.

Ключевой переменной, которую требуется определить, является временной шаг, необходимый для выпуска достаточно надежного прогноза для данной местности. Если временной шаг составляет, например, шесть часов, данные должны собираться каждые три часа или даже чаще. Во многих случаях пополнение наблюдательной сети, обслуживаемой персоналом, некоторым количеством автоматизированных постов может обеспечить достаточно оперативную сеть. Использование все большего объема данных может стать необходимым условием для улучшения эффективности

модели, что, скорее всего, увеличит затраты. Это является основным определяющим фактором при наблюдениях, сборе и анализе данных, используемых при разработке подходящей модели и для оперативного прогнозирования паводков. Большой объем данных влечет за собой увеличение затрат и требует большего времени на сбор и анализ данных и привлечения большего числа сотрудников. Экономическая эффективность модели по отношению к ее относительной точности и итоговым последствиям требует проведения должного анализа при определении требований к данным.

Дистанционное зондирование играет важную роль при сборе новейшей информации и данных как во времени, так и в пространстве. Применение методов дистанционного зондирования имеет большое значение при пространственном оценивании, в частности осадков и почвенной влаги. Такие методы предоставляют больше возможностей при сезонном прогнозировании, способствуют развитию прогнозирования штормовых нагонов, засух и межней, а также помогают совершенствовать менеджмент риска.

Быстрое распространение Интернета во всем мире не только предоставляет прекрасный механизм для распространения гидрологических данных и прогнозов среди различных сообществ пользователей, но и обеспечивает богатый источник данных, прогнозов и информации для национальных метеорологических и гидрологических служб. Интернет является источником ценной информации для гидрологических прогнозистических служб. Эта информация может включать метеорологические и гидрологические модели, документацию по гидрологическому прогнозированию, данные географической информационной системы, продукцию глобального метеорологического прогнозирования в режиме реального времени и гидрологическую прогнозистическую информацию. Огромное количество данных, программного обеспечения и документации имеется для использования, и эти источники ежедневно пополняются. Ссылки на некоторые страницы в сети Интернет или универсальные адреса ресурсов (URLs) приведены в конце главы для информации.

7.3 **МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ** [ГОМС J04, J10, J15, J80]

7.3.1 **Требования к моделям для прогнозирования паводков**

Учитывая официально признанную проблему изменчивости климата и ее ожидаемое влияние на интенсивность, частоту и последствия паводков и засух, значение прогнозирования в последние годы возросло.

В этом разделе излагаются основные математические и гидрологические методы, которые являются компонентами любой системы прогнозирования. Также кратко описываются критерии, используемые при выборе методов и определении параметров. Примеры использования этих компонентов для конкретных применений даются в разделах 7.4–7.6.

При прогнозировании паводков в центре внимания находится время и степень точности прогноза. Фактически специалист, который занимается прогнозированием, участвует в гонках со временем. Очевидно, что модели, используемые прогнозистическими организациями, должны быть надежными, простыми и способными обеспечивать достаточную заблаговременность предупреждений и желательную степень точности. Выбор модели зависит от следующих факторов: количество имеющихся данных; сложность моделируемых гидрологических процессов; требуемые надежность, точность и заблаговременность; тип и частота происходящих паводков и требования пользователей.

Комплексная модель, включающая очень подробные функции, которые позволяют увеличить заблаговременность предупреждения или большую степень точности прогноза, может потребовать весьма тщательного подбора исходных данных. Все входные данные, необходимые для специальной модели, могут отсутствовать в режиме реального времени. Поэтому с практической точки зрения модель для прогнозирования паводков должна соответствовать следующим критериям:

- a) она должна обеспечивать надежные прогнозы с достаточной заблаговременностью предупреждения;
- b) иметь приемлемую степень точности;
- c) соответствовать требованиям к данным в плане их наличия и финансовых средств как на стадии калибровки, так и при оперативном использовании;
- d) содержать доступные для понимания функции;
- e) быть достаточно простой для использования оперативным персоналом со средним уровнем подготовки.

Конечно, выбор не должен ограничиваться конкретной моделью. Всегда лучше выбирать и калибровать столько моделей, сколько возможно, обращая пристальное внимание на пригодность каждой модели для работы в различных условиях. Эти модели должны применяться в соответствии с теми условиями, в которых они должны функционировать.

Комплексные модели, которые весьма сложны, обычно требуют вычислительной техники, например компьютеров подходящего размера. Однако во многих местах

подобной техники нет. Иногда отсутствует подготовленный должным образом персонал; к тому же в ряде случаев компьютеры не могут использоваться из-за периодически возникающих проблем, таких как перебои с электричеством. Следовательно, можно разрабатывать как комплексные модели на компьютерной базе, так и простые типы моделей. Методы с использованием компьютерной техники могут применяться в обычном режиме, а при чрезвычайной ситуации могут быть использованы обычные методы, которые, как правило, просты.

Кроме выбора различных моделей желательна их калибровка для различных условий. Например, модель может быть откалибрована соответственно для большой сети данных наблюдений; однако в то же время модель должна быть откалибрована для меньшей сети и должным образом учитывать возможные сбои при наблюдениях и передачу некоторых данных в режиме реального времени. Это будет полезно при использовании модели даже в условиях чрезвычайной ситуации, когда отсутствуют данные со всех станций. Для этого потребуются различные наборы параметров для разных условий.

7.3.2 Методы прогнозирования паводков

В зависимости от аналитического подхода, используемого для разработки прогностической модели, методы прогнозирования паводков можно классифицировать следующим образом:

- a) методы, основанные на статистическом подходе;
- b) методы, основанные на механизме формирования и распространения паводков.

Методы прогнозирования в форме математических связей, разработанные с помощью исторических данных наблюдений и статистического анализа, широко использовались в прошлом. Они включают простые, эмпирически установленные связи рассматриваемой величины с некоторыми дополнительными параметрами и связи уровня воды с максимальными осадками. Эти связи можно легко установить, и поэтому они чаще всего используются на начальном этапе формирования системы прогнозирования паводков. Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования стока в период паводков — это другой подход в моделировании, который в последнее время приобрел популярность.

Процедуры прогнозирования в возрастающей степени основываются на более полных физических описаниях основных гидрологических и гидравлических процессов. Во многих случаях, когда необходимы прогнозы расходов или уровней воды по длине реки, гидрологи используют модели типа «осадки–сток»

совместно с моделями распространения паводочной волны. Если осадки представлены в форме снега, применяются модели снеготаяния. Эти модели различаются по точности и сложности, занимая весь спектр от моделей, основанных на использовании индекса предшествующего увлажнения, до многопараметрических концептуальных моделей или моделей процессов. Следуя за достижениями в сфере компьютерных технологий и телеметрии, прогностические модели становятся в последнее время более гибкими с точки зрения предоставления информации и возможности использования новых данных и накопленного опыта в режиме реального времени.

Существует много разновидностей этих основных категорий моделей, и большинство различается в зависимости от способа параметризации гидрологических процессов. Модели могут варьироваться от самых простых, построенных на статистической связи между осадками и стоком в сочетании с уравнением трансформации, до моделей, характеризующихся гораздо более высокой степенью сложности.

Гидрологические модели можно разделить на модели с сосредоточенными, распределенными и полураспределенными параметрами. Модели могут быть событийными или непрерывными. Если модель способна оценивать только конкретное событие, например пик паводка в результате шторма, то такая модель называется событийной. Непрерывная модель способна предсказывать весь гидрограф паводка за заданный интервал времени. Требования при выборе модели включают следующие факторы:

- a) цели прогнозов и требования к ним;
- b) степень необходимой точности;
- c) наличие данных;
- d) наличие технических средств;
- e) наличие подготовленного персонала для разработки модели и ее оперативного использования;
- f) возможность модернизации модели.

За последние двадцать лет был сделан значительный прогресс в развитии методологии и улучшении производительности таких моделей. Однако производительность обычно изменяется в зависимости от моделируемых характеристик речного бассейна, наличия данных для калибровки и опыта работающего с моделью гидролога и его понимания этой модели. Существует большое число общедоступных и запатентованных моделей для прогнозирования паводков. В главе 6 настоящего Руководства дается описание многих имеющихся на данный момент гидрологических моделей.

7.3.2.1 Статистический метод

Коэффициент корреляции характеризует линейную взаимосвязь между двумя переменными и широко

применяется как математическое средство на первоначальном этапе многих гидрологических анализов. Регрессия — это расширенный корреляционный подход, который обеспечивает получение формулы, по которой можно рассчитать желаемую переменную, например сезонный меженный сток, по данным одного или нескольких имеющихся в настоящее время наблюдений, например по максимальному уровню грунтовых вод в зимний период (см. Draper and Smith, 1966).

Формула для расчета коэффициента корреляции между двумя переменными x и y при длине ряда n имеет следующий вид:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (7.1)$$

где: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ и $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$.

Отсутствие корреляции не означает отсутствие взаимосвязи, поскольку r является показателем только линейной связи и, например, четкая криволинейная зависимость не обязательно будет отражена в высоком значении величины r . И наоборот, корреляционная связь между двумя переменными не означает их причинно-обусловленную связь. Простой график с разбросом точек около прямой линии является графическим представлением корреляционной связи двух переменных и лежит в основе метода прогнозирования максимального уровня воды в реке (см. раздел 7.3.4, посвященный верификации прогнозов).

Если либо переменная x , либо переменная y имеют структуру временного ряда, особенно тренд, то перед установлением корреляционной зависимости необходимо принять меры по исключению этой структуры, и должна соблюдаться осторожность при проверке ее значимости. Методы временных рядов можно применять (см. раздел 7.5.3) тогда, когда предшествующие значения переменной, такой как расход реки, используются для прогнозирования значения той же самой переменной в определенный момент времени в будущем.

Подобным образом получили широкое распространение в гидрологии и уравнения регрессии. Их общий вид является следующим:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots, \quad (7.2)$$

где X — текущие значения наблюдаемых переменных, а Y — будущее значение прогнозируемой переменной; b — показывает коэффициенты регрессии, рассчитанные по наблюдаемым значениям Y и X . Переменные X могут включать уровень или расход воды выше по течению реки, осадки, характеристики водосбора,

температуру воздуха или сумму дождевых осадков за сезон. Переменная Y может характеризовать как минимальный, так и максимальный уровень воды. Коэффициент множественной корреляции определяет степень достоверности связи. Другая мера соответствия — стандартная ошибка оценки — характеризует разброс точек относительно линии регрессии, построенной для обучающей выборки. Эта теория излагается во всех основных учебниках по статистике.

В некоторых случаях применение аппарата линейной регрессии приводит к неудовлетворительным результатам, и возникает необходимость в нормализации переменных X или Y . Мощный инструмент преобразования может применяться для преобразования Y в Y_T посредством следующих уравнений:

$$\begin{aligned} Y_T &= (Y^T - 1)/T, & T \neq 0. \\ Y_T &= \ln(Y), & \text{если } T = 0. \end{aligned} \quad (7.3)$$

Эти числовые выражения охватывают степенное, логарифмическое и гармоническое преобразования на непрерывной шкале T . Подходящее значение T может быть найдено подбором, при котором уменьшается асимметрия, или графически при помощи диаграммы, как показано на рисунке II.7.4.

Нелинейные связи можно также описать с помощью полиномов, например, вводя X , X_i^2 или X_i^3 в уравнение регрессии. С другой стороны, методы с использованием процедуры минимизации целевой функции открывают простой способ подбора параметров строго нелинейных уравнений. Выбор подходящего набора из большой совокупности переменных требует определенных навыков, в частности тщательного анализа разностей между наблюдаемыми и рассчитанными величинами в обучающей выборке. Обстоятельства, вызывающие появление больших остаточных отклонений, часто указывают на необходимость выполнения корректировок. Для исследования различных сочетаний переменных должны быть использованы преимущества компьютерной обработки и графического изображения остаточных отклонений. Следует избегать полностью автоматизированного поиска и выбора процедур с использованием ступенчатого, поэтапного, прямого и обратного отбора выборок и оптимальных группировок переменных. Примеры применения регрессионных методов для различных задач прогнозирования даны в разделах 7.3.2.3 и 7.4.7.

7.3.2.2 Модели с использованием индекса влажности почвы

Индекс предшествующих осадков описан в разделе 6.3.2.2. Этот подход во многих странах является основным средством для оперативного прогнозирования. В качестве меры влияния на сток осадков, выпавших

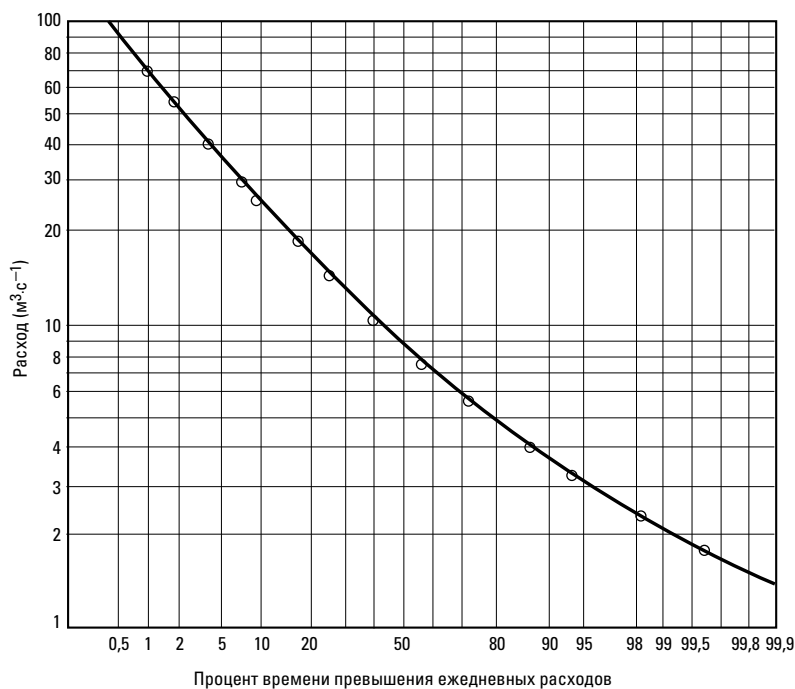


Рисунок II.7.4. Кривая продолжительности стока ежедневных расходов

до выпуска прогноза, этот индекс представляет собой показатель влажности верхнего слоя почвы. Наиболее часто встречающимися показателями являются индекс предшествующего увлажнения и условия предшествующего увлажнения. Методы, основанные на использовании показателя влажности почвы, обладают двумя важными особенностями при их применении в гидрологическом прогнозировании. Во-первых, поскольку этот показатель ежедневно обновляется, он подходит скорее для разового анализа отдельного гидрологического события, а не для непрерывного моделирования. Следовательно, для того, чтобы применять его при составлении большинства прогнозов, необходимо разделить весь рассматриваемый период выпадения осадков на отдельные случаи или разделить каждый случай выпадения осадков на отдельные периоды. Например, во время длительного дождливого периода, прерываемого короткими периодами с малым количеством осадков или вовсе без осадков, может быть трудно решить, был ли это один ливень или несколько.

Вторая особенность применения индекса влажности почвы заключается в том, что при применении метода единичного гидрографа определяется только гидрограф поверхностного стока. Для построения гидрографа суммарного стока необходимо определять базисный сток каким-либо другим методом. Данный метод может применяться в оперативной практике только в тех случаях, когда имеет значение поверхностный сток, и единственно обоснованным является простой подход.

7.3.2.3 Упрощенные методы прогнозирования уровня воды

При прогнозировании отдельного события в самом общем случае необходимо спрогнозировать максимальный уровень воды или пик паводочной волны. На средних реках для этого используются простые графики связи уровней воды в створе, расположенном выше по течению, с уровнями воды в нижнем створе, обеспечивая, таким образом, прогноз с заблаговременностью, равной времени добегания паводочной волны между створами. Эта процедура представлена на рисунке II.7.5.

Обычной является последовательная «цепочка» таких прогнозов, когда спрогнозированный уровень с верхнего участка служит «входом» для прогноза на нижнем участке. Такого рода графики могут использоваться для прогноза гидрографов стока во многих случаях, если учитывать разницу во времени добегания на подъеме и спаде стока. В тех случаях, когда применение простых соотношений типа «створ–створ» (рисунок II.7.5) не дает эффекта, можно использовать следующую корреляционную зависимость:

$$(h_2)_{t+\Delta t} = f(h_1)_p I_{loc}, \tag{7.4}$$

где h_1 и h_2 обозначают соответственно максимальные уровни на станции в верхнем и нижнем течении; I_{loc} — боковой приток на участке между станциями, и Δt — время добегания. На рисунке II.7.6 приведен

пример зависимости такого типа. Для сокращения числа переменных в уравнении можно использовать суммы расходов в соответствующее время по двум или более вышерасположенным постам в качестве объединенной переменной взамен максимальных уровней отдельных притоков. Варианты этих основных подходов могут быть разработаны с учетом различий во времени руслового добегания и количества воды, поступающей от притоков. Графический способ решения может быть полностью заменен численным расчетом посредством применения метода множественной регрессии (см. раздел 7.3.2.1). Уравнение регрессии этого типа может иметь следующий вид:

$$h_{max} = b_0 + b_1Q_1 + b_2Q_2 + \dots, \tag{7.5}$$

где Q_1, Q_2, \dots — расходы воды в вышерасположенных пунктах в данный момент времени. Другие объясняющие переменные, такие как дождевые осадки или характеристики предшествующих условий на водосборе (раздел 7.3.2.2), могут дополнять или заменять расход воды.

7.3.2.4 Концептуальные модели речного стока

Существует немало основных категорий данных моделей, и большей частью они отличаются друг от друга концепцией понимания гидрологических процессов. Гидрологические модели и/или прогностические методы используют данные об осадках и стоке в реальном

времени и преобразуют эти данные наблюдений в значения стока в будущем. Гидрологические модели или методы различаются по сложности, точности и простоте использования. Простые модели состоят из таблиц, графиков или установленных эмпирическим путем соотношений. Более сложные системы гидрологического моделирования используют данные наблюдений *in situ* и данные дистанционного зондирования, а также составные гидрологические модели, объединенные для получения более точных гидрологических прогнозов. Развитие персональных компьютеров сделало возможным прогон на них комплексных моделирующих систем. Эти системы проще в использовании и обслуживании, чем их предшественники.

За последние двадцать лет были сделаны большие шаги в развитии теории и эксплуатационных качеств моделей. Эффективность модели меняется в зависимости от моделируемых характеристик речного бассейна, наличия данных для калибровки и оперативного использования, от понимания специалистом-гидрологом, работающим с моделью, того, как эта модель работает. Данные обычно выступают фактором, ограничивающим допустимую точность при оперативном использовании модели. Однако в связи с тем, что данные ГИС становятся все более доступными, параметры гидрологических моделей могут быть оценены без привлечения для калибровки исключительно временных рядов данных наблюдений.

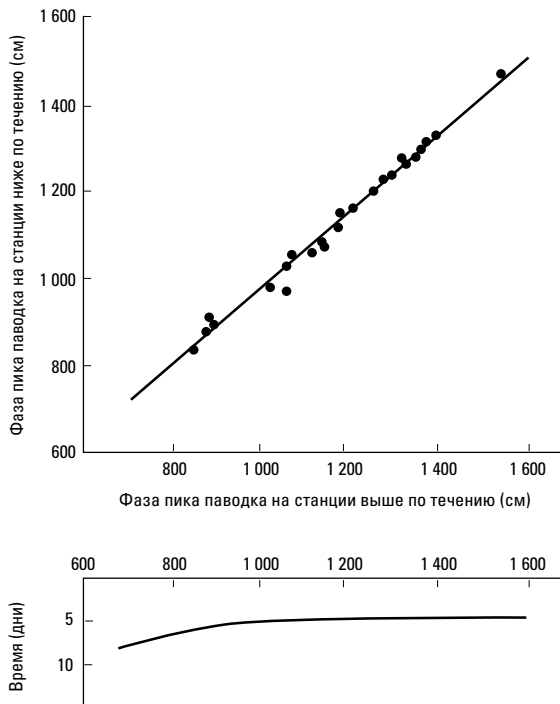


Рисунок II.7.5. Фаза пика паводка и время прохождения для реки Волга

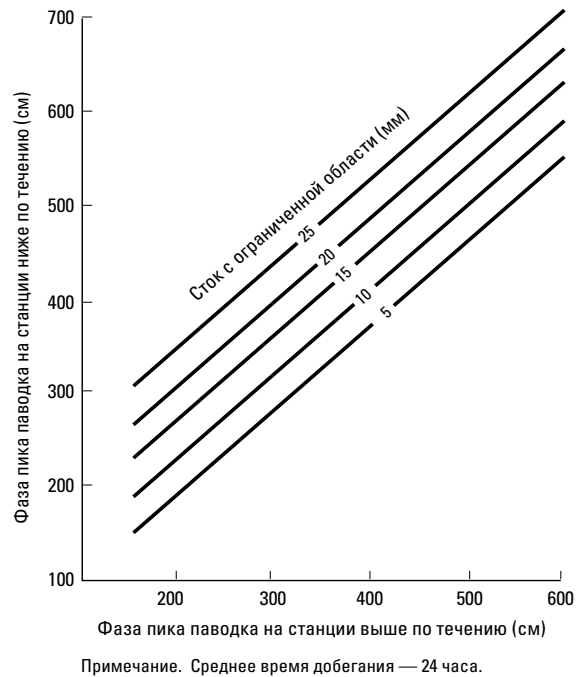


Рисунок II.7.6. Стандартное соотношение переменных для местного притока

Примечание. Среднее время добегания — 24 часа.

Наличие оперативных оценок осадков с высоким пространственным и временным разрешением, полученных при помощи метеорологических радиолокаторов, и существенное увеличение мощности компьютеров сделали возможным использование гидрологических моделей с распределенными параметрами. Изобилие моделей с распределенными параметрами объясняется наличием соответствующих баз данных по характеристикам поверхности суши и почв. Карпентер и др. (Carpenter and others, 2001), Огден и др. (Ogden and others, 2001), Бивен (Beven, 2002), Смит и др. (Smith and others, 2004a) дали в общих чертах описание самих моделей с распределенными параметрами и проблем, возникающих при их использовании в оперативном прогнозировании.

Существенное влияние неопределенностей исходных данных об осадках, структура модели и ошибки параметров в случае малых масштабов быстроразвивающихся бурных паводков препятствовали более раннему использованию моделей с распределенными параметрами при оперативном прогнозировании. Тем не менее эти модели позволяют получить дополнительную информацию и проникнуть в суть гидрологической обстановки в местах, где отсутствуют данные наблюдений за стоком. В Соединенных Штатах Америки в рамках проекта по взаимному сравнению моделей с распределенными параметрами, спонсируемого Национальным управлением по исследованию океанов и атмосферы (НУОА), был проведен форум, посвященный применимости моделей с распределенными параметрами с использованием оперативных качественных данных и анализу проблем, связанных с их использованием (Smith and others, 2004b). Для того, чтобы учесть неопределенность данных об осадках в случае малых масштабов (см. Collier and Krzysztofowicz, 2000) и ошибки гидрологической модели, при использовании гидрологических моделей с распределенными параметрами для территорий, подверженных воздействию быстроразвивающихся бурных паводков, рекомендуется выпускать вероятностные, а не детерминистические прогнозы. Вероятностное прогнозирование стока остается наиболее изучаемой областью гидрологии (см. Carpenter and Georgakakos, 2004).

7.3.3 Способы обновления моделей

В основе корректировок прогноза обычно лежит использование выходных данных модели и непосредственные измерения переменных состояния. Существует множество способов обновления прогнозов. Если наблюдение производится за прогнозируемой выходной величиной Y_i — есть возможность осуществить корректировку последующих прогнозов с учетом известной погрешности прогноза $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$, где \hat{Y}_i — оценка прогноза. Большинство корректировок являются результатом субъективного суждения прогнозиста,

однако различные математические методы позволяют формализовать этот процесс. основополагающие принципы формального подхода описаны ниже.

В самом простом виде корректировки прогнозов могут осуществляться путем исключения текущей погрешности из нового прогноза. Чтобы избежать точек разрыва, корректировка обычно вводится в рассчитанный гидрограф в течение нескольких интервалов времени. Более сложная процедура заключается во временном статистическом анализе рядов погрешностей e_1, e_2, \dots, e_i с целью выявления возможных трендов или периодических изменений, которые могут быть экстраполированы для оценки новой потенциальной ошибки \hat{e}_{i+1} , которая может быть использована для корректировки новой прогнозируемой величины \hat{Y}_{i+1} .

Существует два основных вида обновления модели в режиме реального времени:

- обновление параметров, когда некоторые, а, возможно, и все оценки параметров модели регулярно обновляются с использованием поступающих данных, например об осадках и о стоке. Эти данные поступают от традиционной телеметрической аппаратуры или более современных систем диспетчерского управления и сбора данных, также известных по аббревиатуре SCADA;
- обновление состояний, при котором по мере поступления новых данных выполняются регулярные оценки переменных состояния в модели, например стока или уровня воды.

Иногда эти операции по обновлению проводятся как единое целое путем использования особого алгоритма оценки параметров–состояния, например обобщенного фильтра Калмана. В качестве альтернативы операции могут осуществляться одновременно, но отдельными алгоритмами. Эти алгоритмы оценки обычно известны как рекурсивные алгоритмы, т. к. с их помощью данные обрабатываются рекурсивным методом, когда новые оценки являются функциями предыдущих оценок плюс функция оценочной погрешности. Примерами таких алгоритмов могут служить рекурсивные алгоритмы наименьших квадратов, широко используемые в гидрологии (см. Cluckie and Nan, 2000), и рекурсивный алгоритм инструментальных переменных, описанный Янгом (Young, 1993).

Фильтр Калмана и обобщенный фильтр Калмана — это рекурсивные методы оценки, которые применялись в гидрологическом прогнозировании, но они требуют значительной математической и гидрологической подготовки, с тем чтобы обеспечить соответствующую форму прогностической модели для проведения анализа.

Общий вид рекурсивного алгоритма оценивания параметров модели следующий:

Процесс нововведений (прогнозирование на один шаг вперед)

$$\hat{a}_t = \hat{a}_{t-1} + G_t \{y_t - \hat{y}_{t-1}\}; \hat{y}_{t-1} = f\{\hat{a}_{t-1}, \hat{y}_{t-1}\}. \quad (7.6)$$

Общий вид алгоритма оценивания состояния:

Уравнение модели

Прогноз: $\hat{x}_{t-1} = f\{\hat{x}_{t-1}, \hat{a}_{t-1}\}.$

Процесс нововведений

Корректировка: $\hat{x}_t = \hat{x}_{t-1} + G_t \{y_t - \hat{y}_{t-1}\}, \quad (7.7)$

где $y = g\{x_t\}$ — данные наблюдений, которые связаны с переменными состояния модели определенным способом, а G_t — матрица временных переменных, часто называемая весом системы, вычисляемая рекурсивно и являющаяся функцией неопределенности параметра или оценок состояния. Алгоритм, объединяющий эти две операции рекурсивного оценивания, часто называют алгоритмом ассимиляции данных (см. Young, 1993).

Однако можно также использовать более концептуальный метод корректировки выходных данных гидрологической модели. Этот метод не требует каких-либо изменений в структуре модели или в алгоритмах, используемых в данной модели. С помощью этого метода осуществляется скорее корректировка входных данных и, соответственно, переменных состояний, таким образом, чтобы более точно воспроизвести текущие и предшествующие величины стока. Эти откорректированные величины используются затем для прогнозирования гидрографа.

Корректировки прогноза не обязательно должны основываться только на выходных данных модели. Они могут быть выполнены путем измерений переменных состояния для сравнения с величинами, полученными по модели. Например, в одном из методов данные измерений водного эквивалента снежного покрова используются для уточнения прогнозов сезонного стока, получаемых с помощью концептуальной модели. Непосредственная замена данных полевых измерений данными цифрового моделирования значений переменных состояния модели будет неправильной, т. к. на практике упрощение модели может привести к утрате переменными состояния их прямых физических значений.

7.3.4 Верификация прогнозов

Верификация прогнозов определяет соответствие между рядом прогнозов и соответствующим рядом

наблюдений. Никакую прогностическую систему нельзя считать полной без процедур верификации, выполняемых в административных и научных целях, а также в интересах пользователя.

Для оценивания успешности прогнозов могут быть вычислены различные статистические характеристики. Используемые статистики будут зависеть от типа прогноза, целей прогноза и проверки. Изучение эффективности предлагаемых показателей для эффективного описания успешности прогноза должно проводиться до осуществления программы верификации.

Чтобы быть эффективной, система верификации должна включать архив прогнозов и данных наблюдений, по которым должны оцениваться прогнозы. Кроме того, для содействия интерпретации вычисленных показателей должен быть включен базовый прогноз. Выбор базового прогноза будет зависеть от типа проверяемого прогноза и процесса, используемого для разработки прогноза. Для краткосрочных детерминистических прогнозов с заблаговременностью менее двух дней полезной основой является инерционность.

Для долгосрочных и вероятностных прогнозов более подходящей основой будет распределение климатических характеристик или климатическое запаздывание на воздействие. Если процесс прогнозирования состоит из нескольких шагов, должны быть также архивированы дополнительные промежуточные данные для обеспечения проверки каждого этапа этого процесса. По возможности, исходные данные, используемые при расчете прогноза, должны быть архивированы для ретроспективных исследований возможной доработки процесса прогнозирования. Подлежащие архивированию данные должны включать данные наблюдений, исходные данные для составления прогнозов, например осадки и данные о температуре, и параметры модели, включая кривые расходов. Более подробную информацию можно найти в прекрасных работах Джоллифа и Стефенсона (Joliffe and Stephenson, 2003). В 1995 г. ВМО провела обзор применения систем прогнозирования паводков (МОФФС) с целью найти применимую на международном уровне основу для предоставления быстрой, конкретной информации о работе систем прогнозирования паводков, в основе которых лежит регистрация превышения уровней воды на реках. Цель этого проекта — быстро определить основные недостатки в устройстве и характеристиках отдельных систем прогнозирования для того, чтобы успеть принять соответствующие административные меры по исправлению дефектов до следующего паводка.

7.4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЫСТРОРАЗВИВАЮЩИХСЯ БУРНЫХ ПАВОДКОВ [ГОМС J04, J10, J15]

Быстроразвивающиеся бурные паводки — это стремительное повышение уровня воды в результате интенсивных осадков или при прорыве плотины. Ливневые быстроразвивающиеся бурные паводки относятся к чрезвычайным гидрологическим явлениям, которые развиваются за несколько часов — обычно менее чем за шесть часов — после вызвавшего их события, как правило, в горных районах или в районах, где преобладает водонепроницаемая поверхность, например, на урбанизированных территориях. Хотя большинство таких паводков вызывается ливнями, прорывы естественных или искусственных плотин также могут вызвать высвобождение больших запасов воды за короткое время и иметь катастрофические последствия в расположенной ниже по течению части бассейна реки. В качестве примеров можно привести прорывы ледяных заторов или временных наносоздерживающих дамб.

7.4.1 Национальные программы по прогнозированию быстроразвивающихся бурных паводков

До появления в наличии пространственных цифровых данных с высоким разрешением, получаемых с помощью метеорологических радиолокаторов и спутниковых платформ, и цифровых территориальных данных о рельефе с высоким разрешением прогнозирование быстроразвивающихся бурных паводков, наряду с требуемым пространственно-временным разрешением, в масштабе страны было невозможно. Однако в последние годы данные высокого разрешения появились в наличии в большинстве стран, а увеличение мощности компьютеров позволило разрабатывать национальные программы по прогнозированию таких паводков.

7.4.1.1 Сотрудничество между гидрологами и метеорологами

Вследствие короткого времени добегания быстроразвивающихся бурных паводков своевременное и точное выявление, а также краткосрочное прогнозирование ливней, речного стока и/или уровней воды являются важными составляющими успешного прогнозирования таких паводков и функционирования системы предупреждений о них. Это превращает прогнозирование быстроразвивающихся бурных паводков в подлинно гидрометеорологическое мероприятие, которое извлекает пользу из тесного сотрудничества между метеорологами и гидрологами в национальных и

региональных центрах прогнозирования. Кроме того, локальный характер быстроразвивающихся бурных паводков, вызванных выпадением осадков, требует выполнения детализированных местных и региональных наблюдений, анализа и моделирования ливней и стокообразующих/русловых процессов на территориях, подверженных воздействию быстроразвивающихся бурных паводков, а также привлечения баз пространственно-временных данных высокого разрешения.

7.4.1.2 Сотрудничество национальных и региональных или местных агентств

Даже при наличии национальных программ по прогнозированию быстроразвивающихся бурных паводков для успешного функционирования систем требуется участие на региональном и местном уровнях. Местные и региональные физико-географические особенности оказывают значительное воздействие на формирование и развитие таких паводков. Метеорологические и гидрологические условия могут меняться от времени ввода данных на национальном уровне до времени, когда на местах или на региональном уровне необходимо отреагировать на прогнозы. Степени ошибки при измерениях с помощью метеорологического радиолокатора и данные спутников сильно меняются от места к месту. В конце концов, конечные пользователи на локальном уровне — все слои населения, отдельные отрасли, агентства по управлению водными ресурсами и т. д. — возможно имеют различные требования к предупреждениям об угрозе паводков, что не обязательно предусмотрено национальной программой по прогнозированию паводков. В идеальном случае в это сотрудничество должны вовлекаться региональные службы прогнозов, местные органы по чрезвычайным ситуациям и конечные пользователи.

Для конечных пользователей, возможно, будет необходим выпуск дополнительных видов продукции, которые используют национальные прогнозы быстроразвивающихся бурных паводков и другую вспомогательную информацию, получаемую от национальных центров прогнозов для удовлетворения их индивидуальных потребностей на местном уровне. Например, это могут быть действия по дальнейшему уточнению прогнозов определенных паводковых уровней, которые не предусмотрены национальной программой, или установка и использование местных автоматических сетей осадкомеров и специализированных радиолокаторов там, где национальные метеорологические радиолокаторы и спутники не дают надежных данных. В таких случаях национальная программа прогнозов паводков берет на себя руководство по управлению действиями во время паводка.

7.4.1.3 **Взаимодействие с конечными пользователями**

При выпуске прогнозов быстроразвивающихся бурных паводков с высоким пространственно-временным разрешением желательно разработать весомую программу взаимодействия прогнозистов и пользователей, которая будет служить нескольким целям: информировать пользователей — региональные службы прогнозов, местные органы по чрезвычайным ситуациям, широкие слои населения или других конечных пользователей о том, что означают национальные прогнозы быстроразвивающихся бурных паводков; снабжать информацией о подтверждении достоверности прогнозов и ограничениях действующих национальных систем; поддерживать принятие решений на местном уровне; разрабатывать методические указания для соответствующих пользователей о порядке действий в случае выпуска предупреждений о паводке; организовывать каналы обратной связи с пользователями для получения информации о работе оперативной системы и т. д. Эта программа взаимодействия в долгосрочной перспективе поможет повысить эффективность национальной продукции по прогнозированию быстроразвивающихся бурных паводков.

В ряде стран прогнозы быстроразвивающихся бурных паводков распространяются с помощью сводок и предупреждений. Если наблюдаются или прогнозируются метеорологические условия, указывающие на возможное выпадение ливневых осадков, то по радио и/или телевидению передаются соответствующие сводки. Они предупреждают местное население об угрозе выпадения осадков, способных вызвать затопление. Когда поступает сообщение о выпадении ливневых осадков, которые могут вызвать паводок, то сводка сопровождается предупреждением, благодаря чему население в данном районе успевает принять необходимые меры защиты от паводка.

7.4.2 **Локальные системы прогнозирования быстроразвивающихся бурных паводков и предупреждений о них**

Существует большое разнообразие подходов к прогнозированию быстроразвивающихся бурных паводков и выпуску предупреждений о них для конкретно расположенных постов — от методик самостоятельного прогнозирования паводков, в основе которых лежит использование локальных сетей автоматических самописцев, до более сложных, которые включают краткосрочное прогнозирование местных осадков и стока. Эти методики разработаны для раннего предупреждения местного населения, коммунально-бытовых

компаний и других региональных или местных организаций, с тем чтобы они могли действовать незамедлительно при получении предупреждения. Ниже рассматриваются несколько репрезентативных подходов применительно к конкретному месту.

7.4.2.1 **Самостоятельные программы прогнозирования**

Самостоятельные системы предупреждения о наступлении быстроразвивающихся бурных паводков используются местным населением для того, чтобы свести к минимуму задержки при сборе данных и распространении прогнозов. Местный координатор противопаводочного оповещения обучен составлению предупреждений о надвигающемся паводке на основе заранее оговоренных процедур или с помощью моделей, разработанных квалифицированными службами прогнозов. Эти методики могут применяться, когда данные, полученные в реальном времени, и/или прогнозы дождевых осадков указывают на потенциальную возможность затопления. Уравнения множественной регрессии представляют собой простой для практического использования метод прогнозирования быстроразвивающихся бурных паводков, краткое описание которого приводится в простой справочной таблице признаков наступления паводков. Этот метод пригоден для применения в широком диапазоне таких различных условий формирования паводков, как дождевые осадки, влажность почвы и температура воздуха.

Возрастающие возможности использования микропроцессоров способствовали усилению тенденции автоматизации большей части процесса сбора и обработки данных, необходимых для подготовки предупреждений о быстроразвивающихся бурных паводках. Автоматические датчики по измерению осадков и уровней воды могут напрямую через канал связи быть связаны с компьютером, который будет управлять системой сбора данных, рассчитывать вероятность наступления паводка или составлять прогноз паводка и даже подавать сигнал опасности. Наиболее критическим элементом в самостоятельной системе является активное участие общественности в ее планировании и функционировании.

7.4.2.2 **Системы оповещения**

Система оповещения о быстроразвивающихся бурных паводках является автоматизированной версией самостоятельной системы предупреждений. Датчик уровня устанавливается по течению реки выше участка, для которого составляется прогноз, и соединяется при помощи наземной связи или радиосвязи с пунктом приема в населенном месте, например с пожарной станцией или полицейским участком, осуществляющими

круглосуточное дежурство. Такие пункты приема оснащены звуковыми и световыми сигнальными устройствами, имеющими релейные контакты для приведения в действие внешнего сигнала тревоги. Сигнал тревоги включается, когда датчик уровня воды в реке фиксирует заданную критическую высоту.

7.4.2.3 Комплексные гидрометеорологические системы

Это более сложные и самые современные системы, и они обычно используются коммунальными и другими региональными и местными организациями, которые самостоятельно оценивают гидрометеорологическую обстановку. В большинстве случаев эти системы позволяют получить наиболее надежные прогнозы наступления паводков для отдельных территорий. Как правило, для реализации этих систем привлекаются комплексные гидрометеорологические модели — концептуальные или физико-математические (см. Georgakakos, 2002). Компонентами этих моделей являются региональный интерполятор оперативной прогностической цифровой информации о погоде в необходимом для обработки данных масштабе 100 км² или менее; модель, описывающая влажность почвы, и модель распространения воды по руслу. Для того, чтобы оценить неопределенности в прогнозах погоды,

поступающих в режиме реального времени, и в конфигурациях данных, получаемых с помощью датчиков, при оценках состояния или ассимиляции данных обеспечивается обратная связь между наблюдениями, выполняемыми в реальном времени, и состояниями модели. В этих системах используются различные формы обобщенного фильтра Калмана и нелинейных фильтров.

Примером комплексных гидрометеорологических систем является система прогнозирования быстро развивающихся бурных паводков в бассейне Панамского канала; более подробную информацию можно найти у Георгакакоса и Сперфслэйджа (Georgakakos and Sperflage, 2004). Бассейн площадью 3 300 км² был разбит на 11 частных водосборов по топографическому признаку в зависимости от наличия водомерных постов, расположения водохранилищ и местных гидрометеорологических факторов (см. рисунок II.7.7). Краткосрочные прогнозы, охватывающие периоды от одного до шести часов, необходимы для смягчения ущерба оборудованию канала и его работе. Метеоролог и гидролог управляют системой и интерпретируют прогнозы осадков и стока.

В рассматриваемом регионе установлен метеорологический радиолокатор с длиной волны 10 см и более

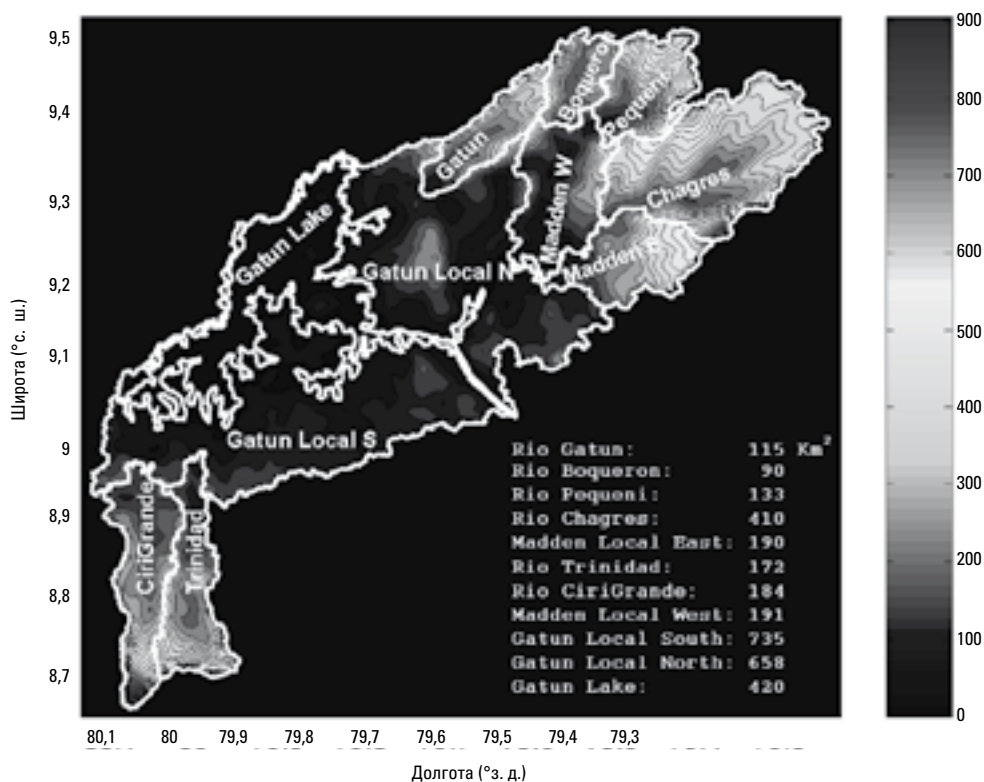


Рисунок II.7.7. Водосбор Панамского канала с горизонталями (1-километровая цифровая модель ландшафта) и водосборами притоков (Georgakakos and Sperflage (2004))

35 автоматических осадкомеров типа ALERT. Расчетная сетка оперативной метеорологической прогностической модели ETA Национальной службы погоды США покрывает регион с разрешением 80 км и позволяет выпускать прогнозы состояния атмосферы над большой территорией дважды в день с 6-часовым интервалом и максимальной заблаговременностью в несколько дней.

Для прогнозирования дождей используется информация модели ETA для 80-километровой сетки, данные радиозонда из верхних слоев атмосферы и приземные метеорологические данные. Модель, используемая для прогнозирования осадков, формирует прогнозы для бассейнов, которые сравниваются с данными радиолокаторов для определения ошибки прогнозов. Результаты прогнозирования дождевых осадков вводятся в модель для определения содержания влаги в почве каждого бассейна, формирующего сток, и в модель русловой трансформации. Отдельный алгоритм состояния используется для обновления состояний модели содержания почвенной влаги с использованием данных о расходах воды, получаемых в режиме реального времени.

Важным аспектом локальных гидрометеорологических систем является проверка прогноза для крупномасштабных быстроразвивающихся бурных паводков. Это дает полезную информацию для прогнозистов, с помощью которой они могут правильно интерпретировать прогнозы и выдавать их в виде сводок и предупреждений. При этом могут использоваться обычные характеристики метода наименьших квадратов, такие как разность средних значений, остаточная вариация, среднеквадратическая погрешность и коэффициент эффективности, наряду с другими рабочими показателями, полученными в сотрудничестве с пользователями прогнозов, в т. ч. ошибки в прогнозе объема воды за данный промежуток времени, максимального значения стока и времени его наступления. На рисунке II.7.8 приведен пример предупреждения о быстроразвивающемся бурном паводке.

7.4.3 **Прогнозы быстроразвивающихся бурных паводков на больших территориях**

Возможность регулярно измерять осадки с высоким пространственно-временным разрешением и наличие баз данных высокого разрешения для поверхности земли и нижележащих слоев обеспечили выпуск национальными учреждениями оперативных прогнозов быстроразвивающихся бурных паводков для больших территорий. Для выпуска прогнозов с высоким разрешением для больших территорий обычно применяют два основных подхода: а) прогнозы с использованием концепции возникновения паводка; б) прогнозы на

основе гидрологических моделей с пространственно-распределенными параметрами. При любом подходе требуются наблюдения за осадками и прогнозы с высоким пространственно-временным разрешением.

Чтобы получить оценочные данные об осадках в требуемом для прогнозирования паводков масштабе, необходимы плотные дождемерные сети. Для прогнозирования в масштабе страны паводков с высоким разрешением на больших территориях данные наблюдений, полученные с автоматических осадкомеров, дополняются данными с региональных метеорологических радиолокаторов и/или спутниковых датчиков. Различные датчики измеряют различные характеристики осадков, и затем вычисляется конечный продукт как наилучшая оценка, объединяющая все полученные данные. Во многих случаях бывает полезно также определять меру неопределенности данных об осадках, поскольку инструментальные погрешности меняются от датчика к датчику и от региона к региону.

Во многих исследованиях обсуждается вопрос об оперативной количественной оценке осадков, полученной объединением данных осадкомеров и метеорологических радиолокаторов. Это и ранние исследования Коллинжа и Кирби (Collinge and Kirby, 1987) в Соединенном Королевстве Великобритании и Северной Ирландии, и более поздние исследования Фултона и др. (Fulton and others, 1998), результаты которых были опубликованы в США, и исследования Сео и Брейденбаха (Seo and Breidenbach, 2002). В таких случаях пространственная изменчивость поля осадков в масштабе быстроразвивающегося бурного паводка вызвана в основном радиолокационными данными, хотя использование автоматических осадкомеров позволяет корректировать поле или зависящее от масштаба искажение данных радиолокаторов с привлечением различных методик, например, как это описано у Клаки и Колье (Cluckie and Collier, 1991), Брага и Массамбани (Braga and Massambani, 1997) и Тачикавы и др. (Tachikawa and others, 2003).

Спутниковые данные об осадках часто калибруются с данными метеорологических радиолокаторов, полученным для схожих по гидроклиматическим показателям регионов и/или с данными сетей автоматических локальных или региональных водомерных постов. Объединение данных, полученных с полярно-орбитальных и геостационарных спутников, также находится на стадии рассмотрения (см. Bellerby and others, 2001).

7.4.4 **Оценивание быстроразвивающихся бурных паводков**

Концепция оценивания быстроразвивающихся бурных паводков применительно к прогнозам паводков



Рисунок II.7.8. Предупредительный знак о быстроразвивающемся бурном паводке

для больших территорий появилась в середине 1970-х годов в США (Mogil and others, 1978). Размер паводка оценивается через количество осадков за заданный промежуток времени, например от одного до шести часов, выпавших над небольшим бассейном, достаточное для возникновения незначительного паводка в замыкающем створе водосбора. Оценка количества осадков часто обновляется и используется для определения вероятности паводка путем сравнения с количеством наблюдаемых или спрогнозированных осадков той же продолжительности и над тем же небольшим бассейном.

Для оценивания паводков в оперативной среде необходимо разработать следующее:

- a) оценки предельного объема стока за различные промежутки времени (в автономном режиме);
- b) модель для расчета почвенной влаги, позволяющую получить кривые связи предельных значений стока с оценками размера паводков для различных условий дефицита почвенной влаги (Sweeney, 1992).

Ранее при оценивании размера паводков использовались статистические связи предельного стока для подготовки требуемых оценок предельного стока по различным региональным и местным данным, например топографическим и климатическим данным. Используя существующие базы цифровых пространственных данных о местности, таких как топографические особенности, данные о русловой сети, землепользовании, характере подстилающей поверхности, наряду с ГИС, Карпентер и др. (Carpenter and others, 1999) предложили решать проблему расчета предельного стока на физической основе и разработали методы для определения объективных оценок предельного стока в масштабе страны с высоким разрешением. Для рассматриваемого небольшого бассейна основное отношение для предельного стока будет иметь следующий вид:

$$Q_{\text{паводок}} = Q_p(R, t_r), \quad (7.8)$$

где $Q_{\text{паводок}}$ — это сток, который, вероятно, способен вызвать незначительный паводок в замыкающем створе; Q_p — максимальный поверхностный сток с бассейна, вызванный эффективными осадками; R — предельный сток за данное время t_r . Расход паводка $Q_{\text{паводок}}$ может быть оценен как сток за данный период повторяемости, например два или четыре года, или с помощью гидравлического уравнения для равномерного установившегося потока при полном заполнении русла в замыкающем створе. Для определения зависимости Q_p от R и t_r может быть применен искусственный или геоморфологический единичный гидрограф. Рассмотрение стока в целиком заполненном русле и естественного единичного гидрографа не требует калибровки и дает консервативные оценки предельного стока в плане ущерба от паводка.

Характеристики поперечного сечения русла в замыкающем створе необходимы для оценивания стока в условиях полного заполнения русла и расчета максимума стока естественного единичного гидрографа. Эти оценки обычно получают из региональных регрессионных связей таких характеристик, как ширина русла при полном заполнении и глубина, а также полученных с помощью ГИС характеристик бассейна — площади, длины реки и среднего уклона, выступающих в качестве предикторов. Эти региональные регрессионные связи строятся на основе данных, полученных из обследований естественных водотоков данного района, и используются для расчета характеристик поперечного сечения русла всех малых водосборов региона.

Разрешение цифровых данных топографической высоты ограничивает наименьший размер бассейнов, для которых может быть выполнен расчет предельных значений стока. Например, если разрешение топографической базы данных составляет 90 м, то характеристики бассейна, например его площадь, расположение, длину и уклон водотока, можно определить с относительными погрешностями от ± 10 до ± 25 процентов для бассейнов площадью более 5 км^2 . Для таких бассейнов с максимальной площадью до 50 км^2 ошибки в оценках предельного стока, подготовленных на основе анализа ГИС данных топографической высоты, могут достигать ± 30 процентов оценочных значений на местах при условии полного обеспечения гидрометеорологическими данными.

Предельный сток выражается через слой эффективных осадков данной продолжительности, способный вызвать в замыкающем створе маленького бассейна незначительный паводок. Как только получены значения предельного стока для отдельного региона или для всей страны в сочетании с оценками дефицита почвенной влаги, поступающими в режиме реального времени, они могут использоваться для определения пороговых значений стока. Эта методика изложена ниже (см. Georgakakos, 2004).

Обычно национальные службы прогнозов в оперативном режиме запускают гидрологическую модель для бассейнов площадью около 1000 км^2 для расчета характеристик стока и выпуска прогнозов в каждый установленный срок подготовки прогноза. После завершения этих прогонов прогнозов текущие оценки индексов почвенной влаги, действительные на время подготовки прогноза, сохраняются. Для содействия расчету быстроразвивающегося бурного паводка при этих исходных условиях гидрологическая модель запускается в автономном режиме по сценарию «что, если» с возрастающими объемами осадков за заданный промежуток времени. В этом сценарии «что, если» используются те же первоначальные оценки почвенной

влаги, которые были выданы моделью при обычном оперативном прогоне. Строится график связи смоделированных значений поверхностного стока и необходимых осадков за заданный промежуток времени. Этот график может быть интерпретирован как связь между предельным стоком (эффективные осадки или объем поверхностного стока) и оценкой риска возникновения быстроразвивающегося бурного паводка (фактический объем осадков). Он используется наряду с оценочным значением порогового стока для данного бассейна с целью определения искомого объема паводка, при этом в отношении обоих действует тот же заданный период времени.

Оценки количества самых последних осадков за время, равное продолжительности периода, за который оценивается размер быстроразвивающегося бурного паводка, могут использоваться для установления неизбежности наступления такого паводка в определенном бассейне. На вероятность паводка указывает превышение наблюдаемых осадков над оценкой риска возникновения паводка. После этого могут быть построены региональные и национальные карты с выделением бассейнов с высокой вероятностью возникновения паводков. Могут быть подготовлены аналогичные карты, показывающие подверженные риску наступления паводков бассейны, которые построены на основе скорее прогнозируемых, а не наблюдаемых объемов осадков в бассейне за заданные промежутки времени. Национальная метеорологическая служба США использует оценки риска возникновения паводков в оперативном режиме на национальном уровне для прогнозов паводков на больших территориях. На региональном уровне эта методика применяется в странах Центральной Америки. Национальные программы для сбора данных, необходимых для определения оценок риска возникновения паводков с целью проверки прогнозов, являются важным дополнением к программам оперативного прогнозирования.

7.4.5 **Прогнозирование быстроразвивающегося бурного паводка, вызванного разрушением плотины**

Катастрофические внезапные наводнения происходят, когда плотина разрушается, и через пролом устремляется вода и затопляет нижележащую территорию. Методы прогнозирования паводков, которые происходят при подобных разрушениях, описаны в разделе 6.3.5.4.

В последние годы развитие ГИС и цифровых данных высокого разрешения о рельефе привело к составлению карт риска затопления для отдельных территорий, лежащих по течению ниже от существующих плотин. Эти карты затоплений, снабженные информацией о времени прохождения паводковой волны, передаются

местным органам власти на территории, лежащей вниз по течению от плотины, и будут полезны при составлении планов эвакуации в случае непредвиденных обстоятельств.

7.4.6 **Штормовые нагоны на реках**

Штормовые нагоны в открытом море возникают под воздействием ветра и изменений атмосферного давления. Они могут быть причиной возникновения гравитационных волн, которые распространяются вверх по течению рек, впадающих в море. Для прогнозирования штормового нагона в устье реки используются методы, описывающие развитие и распространение штормового нагона в открытом море, например модель Национальной метеорологической службы США SPLASH (Jelesnianski, 1974), а также методы прогнозирования распространения штормового нагона в заливах, представленные Оверлэндом (Overland, 1975), а затем с помощью динамического метода рассчитывается трансформация волны вверх по течению реки. Поскольку движению гравитационной волны вверх по реке препятствует течение, распространение штормового нагона может быть наилучшим образом описано с помощью методов гидродинамики (см. раздел 6.3.5). Гидрологические методы расчета перемещения водных масс по руслу, такие как метод кинематической волны, непригодны для расчета движения волны вверх по течению реки. Кроме того, инерционные компоненты гравитационной волны, которые не принимаются во внимание при расчетах по диффузионно-гидравлическим методам, на самом деле слишком важны, чтобы ими пренебрегать при расчетах штормовых нагонов. Ряд работ по проблеме приливов в реках был опубликован Организацией Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (1991). В последних применениях используется ГИС для создания карт риска для территорий, находящихся под угрозой затопления вследствие как штормовых нагонов, так и паводковых волн (см. публикации Программы по тропическим циклонам ВМО).

7.4.7 **Паводки на урбанизированных территориях**

Развивающаяся урбанизация природных затопляемых пойм рек способствовала резкому росту человеческих жертв и материального ущерба. Быстрые демографические и социальные изменения, наряду с ростом цен на землю и проблемами окружающей среды, связанными с загрязнением вод и потенциальным изменением климата, характеризующимся возрастанием изменчивости и экстремальным масштабом, делают проблему управления водными ресурсами на урбанизированных территориях актуальной во всем мире (Pielke and Downton, 2000; Dabberdt and others, 2000).

Различают два вида затопления городских территорий. Первый — когда городская территория затопляется водами рек, вышедших из своих берегов, это флювиальное наводнение. Зоны затопления прогнозируются на основании прогноза уровня воды в реке. Второй — когда затопление городской территории может произойти на отдельном водосборе как особый случай быстроразвивающегося бурного паводка.

Вопросам гидрологии городов и управления водохозяйственной деятельностью посвящено значительное число публикаций (например, Urbonas and Roesner, 1993; Kovar and Nachtnebel, 1996; Dabberdt and others, 2000). Уникальными особенностями гидрологии урбанизированных территорий являются большие площади с водонепроницаемым или слабопроницаемым покрытием и сосуществование естественной и искусственной дренажных систем: сточных труб, струенаправляющих дамб, насосов, прудов-накопителей и т. п. Как следствие, процесс формирования поверхностного стока после осадков будет очень изменчивым и неоднородным, а сток воды и загрязняющих веществ характеризуется более высокими пиками гидрографов в замыкающих створах. Высокая пространственно-временная изменчивость осадков вызывает соответствующую изменчивость стока, поскольку городские водосборы не способны гасить такие колебания. Искусственная дренажная система и развитие естественной системы позволят своевременно пропустить более ранние и более высокие пики паводков. Что касается гидрологических воздействий, то проблема прогнозирования паводков и борьбы с ними становится серьезной для случаев затоплений с повторяемостью один раз в 5–100 лет, в то время как проблема качества воды может быть острой вследствие ливней с периодом повторяемости, например менее двух лет.

В силу особенностей формирования стока на урбанизированных территориях вследствие выпавших дождей и нагрузки загрязняющими веществами, для того, чтобы обеспечить эффективное управление водными ресурсами, требуется очень высокое пространственное и временное разрешение данных, моделей и средств управления на больших территориях (Dabberdt and others, 2000). Таким образом, цифровые данные о высотных отметках поверхности земли, гидрологические модели с распределенными параметрами и данные радиолокаторов вместе с данными автоматических дождемеров в точке и ГИС могут использоваться для подготовки прогнозов стока на урбанизированных территориях и систем управления (Cluckie and Collier, 1991; Braga and Massambani, 1997; Georgakakos and Krajewski, 2000; Kovar and Nachtnebel, 1996; Riccardi and others 1997). Там, где имеют место высокая степень урбанизации и горный рельеф и конвективный режим

погоды, существует большая необходимость в развитии систем управления водными ресурсами высокого разрешения, способных работать на больших урбанизированных территориях.

7.4.8 **Затопление городской территории, вызванное местным водосбором**

В этом случае интенсивные осадки на городской территории могут явиться причиной внезапного затопления улиц и построек на пониженных участках или застроенных районов, расположенных в руслах старых водотоков, подземных переходов, низких участков шоссе и т. д. Такие паводки возникают, прежде всего, из-за недостаточной пропускной способности канализационных систем, что неизбежно усугубляется засоренностью входных люков канализационных труб или тоннелей и выходных отверстий резервуаров-накопителей. В системах предупреждений о затоплениях в городских условиях могут использоваться те же схемы, которые применяются в системах предупреждений о быстроразвивающихся бурных паводках на реках. Такие схемы обычно включают в себя автоматическую систему предупреждения о наступлении быстроразвивающегося бурного паводка или предупреждения общего характера, в основе которой лежит национальная информационно-диагностическая система оценки риска быстроразвивающихся бурных паводков. Возможно также получать оценки риска быстроразвивающихся бурных паводков на урбанизированной территории на основе баз данных о топографии местности высокого разрешения, естественной и искусственной дренажной сети, а также о существующих водозаборных сооружениях.

На подверженных затоплению дорогах тревожное предупреждение для транспорта может иметь вид световых сигнальных установок, приводимых в действие так же, как и система предупредительных сигналов о быстроразвивающихся бурных паводках на реках. Затопление городских территорий обычно затрагивает канализационные системы даже в том случае, когда сточные воды и паводочные воды сбрасываются через различные дренажные сети. Прогнозирование стока с городской территории может способствовать лучшей работе канализационных систем и регулированию загрязненности паводочных вод в комбинированных системах. Обратной проблемой является высокий уровень загрязнения городских стоков. Поскольку сток с городской территории в конечном счете попадает в естественные водотоки, водопользователи ниже по течению реки сталкиваются с проблемами загрязнения воды. Прогнозирование степени загрязнения вод напрямую связано с прогнозированием ливневого стока с городских территорий.

7.5 ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

7.5.1 Прогнозирование водоснабжения

Прогнозы речного стока для нужд водоснабжения являются существенным элементом эксплуатации коммунальных и промышленных систем водоснабжения, ирригационных и гидроэнергетических систем. Прогнозы обычно выпускаются в виде объемов стока за определенные периоды времени: год, сезон или месяц. Продолжительность такого периода зависит от характера спроса на воду и от количества воды в системе. Поскольку прогнозы для нужд водоснабжения составляются за более длительные промежутки времени, чем метеорологические прогнозы, неизбежны погрешности из-за неучета климатических явлений, происходящих в прогнозируемый период. Поэтому рекомендуется для некоторых переменных выпускать прогнозы с указанием вероятности превышения прогнозируемой величины (см. раздел 7.3.4).

Выбор метода прогнозирования определяется характером водосбора, имеющимися в наличии данными и требованиями пользователей. Прогнозы для целей водоснабжения могут составляться с использованием трех основных методов:

- а) прогнозы снеготаяния;
- б) концептуальные модели;
- в) анализ временных рядов.

Методы, основанные на расчете снеготаяния, применяются для водосборов, где сток за счет таяния снега преобладает в общем стоке. В разделе 7.6 дано описание прогнозирования таяния снежного покрова. Обычно для прогнозирования сезонного стока устанавливаются регрессионные связи с измеренным водным эквивалентом снега и потерями на водосборе. Например, спутниковые измерения снежного покрова были сопоставлены с расходом воды реки Инд, и для этого бассейна были получены приемлемые результаты, несмотря на ограниченное количество данных наблюдений по наземным станциям. Эти методы в основном пригодны для прогноза суммарного объема стока и не дают описания распределения стока во времени.

Концептуальные модели можно использовать для прогнозирования объема стока путем повторных прогонов модели с использованием исторических рядов климатических данных на входе в модель. Результатом такого расчета становится ряд прогнозируемых величин, для которых могут быть установлены вероятности превышения. Модели, используемые для прогнозирования водных запасов, должны быть откалиброваны так, чтобы отклонения между наблюдаемыми и рассчитанными значениями стока были минимальными. Поскольку кратковременные изменения

не имеют большого значения, модели с простыми структурами могут дать удовлетворительные результаты.

Методы, основанные на исследовании временных рядов, могут быть полезны при составлении прогнозов объема стока при условии, что расход воды является надежной характеристикой состояния бассейна. Прогностические уравнения обычно просты в применении. Регрессионные модели, в которых сезонный сток прогнозируется в зависимости от предшествующих гидрологических и климатических переменных, можно рассматривать как особый случай методов анализа временных рядов.

Долгосрочные прогнозы, особенно сезонного стока, часто представляются в вероятностной форме, т. е. в виде статистического распределения возможных значений стока в зависимости от слоя осадков, оцениваемого на дату выпуска прогноза. Единственным источником неопределенности являются будущие погодные условия между датой подготовки прогноза и датой, на которую он выпускается. Например, если прогноз, основанный на регрессионном уравнении, дает следующее уравнение:

$$Q_{лето} = b_0 + b_1 R_{осень} + b_2 R_{зима} + b_3 R_{весна} + b_4 R_{лето}, \quad (7.9)$$

то менее информативный вероятностный прогноз может быть составлен только после получения данных о дождевых осадках за предшествующие осень и зиму. Вероятностная компонента прогноза должна учитывать распределение весенних и летних дождевых осадков, которые могут иметь место.

Если только прогностическая модель не является очень простой, то почти наверняка необходимо будет моделирование возможных значений $Q_{лето}$ либо путем повторных выборок из распределения величин $R_{весна}$ и $R_{лето}$, либо путем повторного применения модели к историческим данным величин $R_{весна}$ и $R_{лето}$. Если принимается подход на основе выборки, необходимо будет учесть любую корреляцию, которая может существовать между независимыми переменными. Если же используются подход на основе исторических данных, желательно иметь период наблюдений не менее чем за 30 лет, чтобы получить репрезентативный ряд сочетаний. Применение этого метода не ограничено регрессивными моделями. Любая гидрологическая прогностическая модель может быть запущена с ретроспективными реальными или обобщенными данными с целью получения распределения возможных выходных данных. Более реалистическое описание распределения фактических величин получается в случае, если в модель вводится «шум». Этого можно достичь

добавлением к каждому прогнозируемому значению случайного числа, стандартное отклонение которого равно стандартной погрешности оценки по модели. Более подробно данный вопрос рассматривается в публикации *Long-range Water-supply Forecasting* (Долгосрочное прогнозирование в целях водоснабжения) (WMO-No. 587, Operational Hydrology Report No. 20).

7.5.2 Прогнозирование истощения стока

Длительные периоды без дождя наблюдаются во многих частях мира, особенно там, где преобладает континентальный и весьма сезонный тропический и субтропический климат. Наличие длительных засушливых периодов играет важную роль для сельского хозяйства, которое может быть приспособлено к существующим условиям путем использования специальных технологий, выращивания зерновых культур, адаптированных к данным условиям, или при помощи ирригации. Засуха наступает, когда период без дождей длится дольше обычного, вызывая негативное воздействие на растения и дальнейшее истощение водных ресурсов. Поэтому с практической точки зрения очень важно прогнозировать засуху или дать перспективную оценку времени, в течение которого она продлится.

Простого и однозначного определения засухи не существует, поскольку ее природа меняется в зависимости от типа климата и воздействия засухи, например на водные запасы, ирригацию и выращивание скота. Там, где засухи наблюдаются регулярно, их интенсивность, которая зависит от продолжительности и температуры, становится важным показателем. К экстремальным засухам могут привести относительно раннее наступление сухого сезона или задержка прихода влаги, или и то и другое одновременно. Простые способы записи продолжительности засухи таковы:

- засуха началась после периода без дождей продолжительностью 14 дней;
- засуха закончилась после 20-дневного периода, в течение которого осадки наблюдались в 11 и более дней;
- так же как продолжительность, интенсивность засухи может быть зарегистрирована как суммарная температура, т. е. в градусо-днях.

Индекс интенсивности засухи Палмера (Palmer, 1965) широко применяется в США для определения условий засухи. Метод использует текущие и недавние данные наблюдений за температурой и осадками, которые математически связаны через средние значения, и в итоге позволяет получить индекс интенсивности засухи между -4 (очень сухо) и +4 (очень влажно). Этот метод очень хорошо подходит для картирования индексов и их представления при помощи ГИС и регулярно публикуется в сети Интернет Центром

информации о засухах Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (www.drought.gov).

Характерная реакция реки и бассейна на засуху может быть выражена в виде кривой продолжительности меженного стока и кривой истощения стока. Кривая продолжительности меженного стока четко представляет собой вероятностное соотношение, определяемое за весь период наблюдений, и поэтому можно привести текущие значения стока к той или иной степени вероятности и таким образом прогнозировать ситуацию для более экстремальных стоков. Кривая истощения стока строится в виде графика значений стока за отдельные интервалы времени, например сутки, 5 или 10 дней; длина интервала определяется общей продолжительностью сухого сезона и размером бассейна. В результате при построении график Q в случае t_0 и t_{-5} за весь период истощения стока будет иметь вид кривой:

$$Q(t) = Q_0 e^{-C(t-t_0)}. \quad (7.10)$$

Кривые истощения стока за несколько лет могут быть приблизительно объединены для получения полного соотношения истощения. Это позволяет оценить текущую обстановку по отношению к общему истощению стока бассейна и возможную будущую продолжительность и суровость прогнозируемых условий, например на один или два месяца вперед.

Метеорологические прогнозы могут иметь большое значение при организации борьбы с засухами. В настоящее время большинство ведущих прогностических служб выпускают долгосрочные прогнозы на срок от 2 до 6 месяцев. Они довольно разнообразны и обычно выражены в показателях средних и экстремальных условий.

Анализ кривых спада гидрографов или кривых истощения речного стока — это важный компонент общего анализа стока паводков и стока в период межени. Однако в прогностической деятельности он используется весьма ограниченно, а именно при составлении прогнозов меженного стока. При прогнозировании меженного стока иногда применяется анализ главных кривых истощения стока на больших речных бассейнах, что позволяет делать прогноз на недели и даже месяцы вперед. Этот вид прогнозирования важен для гидроэнергетических и ирригационных систем, где долгосрочное водоснабжение имеет жизненно важное значение для оптимального практического управления. Кроме того, существуют особая область, где ключевые долгосрочные прогнозы выпускаются метеорологами с использованием сложных глобальных климатических моделей. В этом случае дальнейшая гидрологическая работа в основном нацелена на подготовку прогнозов стока и уровней подземных горизонтов,

которые используются для управления водохранилищами и при разработке стратегий распределения водных ресурсов.

Самый простой метод, вероятно, заключается в нахождении графической связи между текущим расходом или уровнем воды и аналогичными характеристиками за n дней до этого, где $n = 1, 2, 4, \dots$ (см. раздел 7.3.2.1). Это установленное отношение может быть использовано для экстраполяции заблаговременных величин, если не было никаких вызывающих возмущения воздействий, например осадков. Отклонения от наиболее характерной линии часто ассоциируют с природными или антропогенными явлениями, информация о которых должна приниматься во внимание при составлении каждого прогноза.

7.5.3 Анализ временных рядов

Набор данных наблюдений за изменчивостью во времени конкретного явления, таких как скорость потока в реке или уровень воды в колодце или озере, может быть представлен как временной ряд. Временной ряд может быть конкретно задан как непрерывный или дискретный в зависимости от того, проводятся ли наблюдения за переменной состояния системы, например стоком, непрерывно или разбиваются на отдельный набор измерений, которые аппроксимируют изменение переменной состояния во времени (см. Kottegoda, 1980).

Поскольку сток является характеристикой состояния водосборного бассейна, для установления прогностических зависимостей можно использовать одномерный анализ временных рядов. Один из таких подходов заключается в использовании моделей авторегрессии со скользящим средним (Box and Jenkins, 1976), которые хорошо подходят для бассейнов с ограниченными данными об осадках, поскольку для подготовки прогноза этого типа требуются только сведения о предшествующем расходе воды:

$$Q_{t+i} = a_0 Q_t + a_1 Q_{t-1} + a_i Q_{t-2} + \dots + b, \quad (7.11)$$

где Q_{t+i} — прогноз с заблаговременностью в один временной шаг, а Q_{t-i} — значения, измеренные до временных приращений i . Коэффициенты a_i и b оцениваются посредством анализа временных рядов. Помимо прогнозируемой величины Q_{t+i} , модель временного ряда позволяет получить распределение возможных отклонений от прогнозируемой величины, и поэтому можно легко вывести оценку погрешности прогноза. Для того, чтобы прогноз среднемесячного стока, полученный по модели временного ряда, был надежен, среднемесячный временной ряд должен иметь широкую автокорреляцию. Это касается больших рек и потоков, дренирующих крупные водоносные горизонты или

озера. Однако прогнозы обычно осуществимы только с заблаговременностью от одного до четырех месяцев. В модель временного ряда можно включать метеорологические переменные, но при наличии таких данных часто оказывается более предпочтительным составлять прогнозы, основанные на использовании регрессионной или концептуальной модели. Модели временных рядов могут также использоваться для определения погрешностей рядов, о чем говорится в следующем разделе.

7.6 ПРОГНОЗЫ СНЕГОТАЯНИЯ

7.6.1 Общие положения

Во многих странах используются методы прогнозирования, основанные на концептуальных моделях талого стока (см. раздел 6.3.3). Такие методы позволяют прогнозировать талый сток на основе данных наблюдений и метеорологических прогнозов. Выпуск кратко- и среднесрочных прогнозов возможен для рек и низменных районов, а средне- и долгосрочных прогнозов — для рек горных районов. Прогнозы сезонных величин стока могут составляться для равнинных и для горных бассейнов, где талый сток составляет значительную часть суммарного речного стока.

Талый сток является характерной чертой режима равнинных рек в районах с умеренным и холодным климатом и некоторых крупнейших рек мира, даже в тропической зоне. Весенний сток многих рек составляет 50–70 процентов годового стока, а в засушливых районах эта величина может достигать 80–90 процентов. Оценки стока используются при управлении водохранилищами, планировании водопотребления, для нужд гидроэнергетики, общественных нужд и для нужд землепользования. Как следствие, было разработано немало гидрологических моделей для прогнозирования талого стока с акцентом на прогнозировании максимального стока и объемов для целей строительного проектирования и управления работой водохранилищ.

7.6.2 Процессы формирования талого стока на равнинных и горных реках

Во время таяния снежного покрова многие процессы, определяющие сток с равнинных и горных бассейнов, протекают одинаково, например таяние снега, задержание воды в снеге, поступление талых вод на водосбор, потери талых вод, водоотдача бассейна, а также время добега талого стока до замыкающего створа. Однако некоторые процессы имеют различия в двух случаях. Например, межгодовая изменчивость потерь

талого стока, образовавшихся за счет таяния снега и поступления свободной воды, намного больше в равнинных районах по сравнению с бассейнами горных рек. Но что более важно: чем больше средняя высота водосбора, тем больше различий в распределении снежного покрова, т. к. высота играет важную роль в количестве, перераспределении и сублимации снежного покрова.

Суммарный сток весеннего половодья равнинных бассейнов зависит от запасов воды в снежном покрове к началу снеготаяния, количества осадков, выпавших после начала снеготаяния, и количества воды, затраченной на инфильтрацию и испарение с речного бассейна. Первый фактор можно установить до некоторой степени путем измерения; однако эти измерения сильно зависят от ландшафта (см. том I, глава 3 данного Руководства). Второй фактор — последующее количество осадков и потери воды за период стока — должен быть определен методом прогнозирования, причем либо вероятностным способом, либо по предположительным средним значениям климатических характеристик. Возможность использования численных краткосрочных прогнозов погоды становится важным вариантом при прогнозировании метеорологического воздействия. Третий фактор — потери талого стока из бассейна — определяется инфильтрационной способностью почвы и емкостью поверхностных понижений, включая крупные некапиллярные поры в верхнем слое почвы. Потери на испарение относительно малы и мало меняются от года к году. Аккумуляция снега и абляция, особенно во время весенней оттепели, являются важными исходными факторами для систем ежедневного гидрологического прогнозирования, которые, в свою очередь, играют исключительно полезную роль в предотвращении паводков и производстве гидроэлектроэнергии. Измерение и анализ распределения снежного покрова в пределах бассейна очень важны для прогнозирования последующего снеготаяния.

В главе 3 тома I настоящего Руководства говорится, что оценки снега на основе данных водосбора обычно осуществляются с помощью снегосъемки и прокладки снегомерных маршрутов, и, как правило, рекомендуется, чтобы в горных районах снегомерные маршруты прокладывались на высоте и по экспозициям, где снеготаяние незначительно или отсутствует до достижения максимального накопления. В условиях равнинного рельефа снегосъемка необходима для представления средних характеристик снежного покрова в пределах данного бассейна и должна выполняться для разных ландшафтов, чтобы правильно отобразить естественную изменчивость ландшафта.

Инфильтрация воды в почву в период снеготаяния является фактором, который сильно меняется от года к году в зависимости от состояния почвы. Скорость

инфильтрации воды в мерзлую почву и суммарное количество поглощенной воды зависят от влажности почвы до замерзания, температуры, глубины промерзания и физических свойств почвы. Размер площади, занятой понижениями, может быть выражен математически в виде функций распределения глубины слоя воды, необходимого для заполнения этих понижений. Такие функции являются относительно устойчивыми характеристиками для каждого речного бассейна.

7.6.3 Кратко- и среднесрочные прогнозы стока талого снега

Кратко- и среднесрочные прогнозы талого стока для крупных речных бассейнов могут быть получены одним из следующих способов:

- a) бассейны равнинных рек разбиваются на отдельные малые частичные бассейны, которые предполагаются однородными по гидрометеорологическим условиям, каждый площадью до 15 000 км², а речная система разделяется на участки, начиная с верховьев реки;
- b) горные бассейны разделяются на высотные зоны. Количество зон зависит от перепада высот между истоком и устьем речной системы, а также от изменчивости гидрометеорологических условий в зависимости от зоны. По опыту некоторых гидрологов оптимальная разница высот для таких зон составляет от 200 до 400 метров с числом зон около 20;
- c) модели калибруются по гидрометеорологическим данным за предшествующие годы;
- d) составляются прогнозы стока для частных водосборов или высотных зон для горных районов, а затем трансформируются до прогнозируемого замыкающего створа (см. раздел 6.3.5).

7.6.4 Долгосрочные прогнозы снеготаяния

Разработка метода долгосрочного прогнозирования стока талого снега требует установления соответствующих задач:

- a) определение соответствующих характеристик речного бассейна, таких как топография, распределение типов ландшафта и виды почв;
- b) определение любых факторов, регулирующих водопоглотительную способность почвы и задержание воды на поверхности водосбора;
- c) определение основных факторов, обуславливающих потери воды в речном бассейне, и пределы их изменчивости от года к году;
- d) определение роли осадков, выпадающих после начала таяния снега, в формировании стока и их изменчивости;
- e) оценка точности данных о стоке, запасе воды в снежном покрове и осадках.

Прогнозы стока талого снега могут быть улучшены, а их заблаговременность увеличена путем использования статистически обработанных репрезентативных данных и/или данных метеорологических прогнозов на предстоящий период снеготаяния.

7.6.4.1 Прогнозы сезонного снеготаяния в равнинных районах

Зависимость между суммарным талым стоком Q_n и запасом воды в снежном покрове для равнинных территорий можно выразить теоретически следующим уравнением:

$$Q_n = (w_n - f) \int_0^{w_n-f} f(y_d) dy_d - \int_0^{w_n-f} y_d f(y_d) dy_d, \quad (7.12)$$

где w_n — водный эквивалент снега; и f — суммарная инфильтрация за период снеготаяния, при этом обе величины выражены в миллиметрах. Функция $f(y_d)$ — это функция распределения площади в зависимости от слоя воды (y_d), необходимого для заполнения углублений на поверхности речного бассейна.

При отсутствии инфильтрации или если ее интенсивность потенциально больше темпов снеготаяния, уравнение (7.12) может быть упрощено следующим образом:

$$Q_n = w_n \int_0^{w_n} f(y_d) dy_d - \int_0^{w_n} y_d f(y_d) dy_d. \quad (7.13)$$

В этом случае сток становится функцией запаса воды в снежном покрове и инфильтрационной способности водосбора.

Количество воды, участвующей в формировании стока в период сезонного снеготаяния, рассчитывается для каждого года в виде суммы:

$$W = \bar{w}_n + \bar{P}, \quad (7.14)$$

где \bar{w}_n — это средний для бассейна запас воды в снежном покрове в конце зимы, а \bar{P} — средняя величина осадков за период стока, при этом обе величины выражены в миллиметрах.

Средний для бассейна водный эквивалент снега можно рассчитать либо как среднее арифметическое, либо как среднее взвешенное значение. Способ среднего арифметического используется, когда пунктов наблюдений за снежным покровом достаточно много и они равномерно распределены по площади. Способ среднего взвешенного используется, когда пункты наблюдений неравномерно распределены по площади бассейна и/или когда распределение снежного покрова неоднородно. Для расчета среднего взвешенного значения запаса воды в снежном покрове рисуется карта его среднего распределения по площади.

В тех районах, где зимой могут наблюдаться оттепели, на поверхности почвы часто образуется ледяная корка. При наличии измерений количество воды, содержащейся в такой корке, должно прибавляться к величине запаса воды в снежном покрове. Очень часто непосредственное определение условий увлажнения почвы для всего бассейна реки, особенно в зимний период, оказывается невозможным из-за отсутствия соответствующих данных. Это главная причина обычного использования косвенных индексов.

В сухих степных районах разница между осадками и суммарным испарением характеризует потенциальную скорость инфильтрации. Во влажной лесной зоне, где в осенний период из года в год содержание влаги в почве равно или больше влагоемкости, эта разница характеризует изменение запаса воды в бассейне в целом. Сток, формируемый за счет поздних осенних осадков, также можно использовать в качестве показателя водоудерживающей способности речных бассейнов в этих районах.

7.6.4.2 Прогнозы сезонного снеготаяния в горных районах

В горных районах наблюдаются значительные различия в климате, почве и растительности вследствие существенного перепада высот. Эти особенности определяют характер формирования талого стока и водный режим водотоков. Поэтому важнейшей характеристикой горного бассейна является распределение его территорий по высоте. Главными источниками стока являются сезонный снежный покров, который аккумулируется в горах в течение холодного сезона, и осадки, выпадающие в течение теплого сезона года.

Длительность периода времени между началом и концом снеготаяния создает возможность для долгосрочного прогнозирования сезонного стока горных рек. Наиболее благоприятные условия для таких прогнозов имеются там, где главным источником стока является сезонный снег, а количество летних осадков сравнительно невелико.

Крутые склоны, скальные породы и широкое распространение водопроницаемого крупнообломочного материала в горных бассейнах создают условия, при которых стекание воды в русла рек происходит преимущественно в толщах отложений и по трещинам горных пород. В этих условиях величина потерь стока не может сильно изменяться от года к году, и существует хорошая зависимость между сезонным стоком и запасами снега в бассейне. Такая зависимость может быть установлена эмпирическим путем, если имеются данные наблюдений за ряд лет. Однако на практике установить такую зависимость часто бывает весьма затруднительно.

7.7 ПРОГНОЗЫ ОБРАЗОВАНИЯ И ВСКРЫТИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА [ГОМС J45]

7.7.1 Общие положения

Многие реки и озера умеренных широт замерзают в зимний период. Наиболее важными фазами ледового режима, для которых составляются прогнозы, являются:

- a) первое появление льда;
- b) образование сплошного ледяного покрова;
- c) вскрытие сплошного ледяного покрова;
- d) полное очищение ото льда.

Ледовый режим рек тесно связан с погодными условиями. Таким образом, сроки появления плавучего льда и даты образования и вскрытия ледяного покрова меняются от года к году в широком диапазоне. Ледовые прогнозы имеют большую практическую ценность для судоходства, однако многие другие пользователи, помимо тех, кто связан с судоходством по внутренним водным путям, также заинтересованы в этих прогнозах.

Имеются надежные соотношения для расчета термического и ледового режима водных объектов, но их применение при прогнозировании ледовых явлений существенно ограничено из-за стохастической природы параметров, используемых в уравнениях, которые изменяются за время между выпуском прогноза и предсказанным явлением. В данной главе рассматриваются различные виды прогнозов ледового режима водных объектов, включая краткосрочные прогнозы формирования и вскрытия ледяного покрова.

В основе современных методов краткосрочного прогнозирования ледовых явлений лежит тепловой баланс (Бужин и др., 1989). Для прогнозирования осенних ледовых явлений используется уравнение теплового баланса на границе между единицей поверхности воды и прилегающей атмосферой. Составляющими теплового баланса являются: прямой обмен теплом, солнечная радиация, турбулентный обмен теплом с атмосферой, обмен теплом за счет испарения, эффективная радиация, приток тепла от поверхности Земли и подземных вод, потеря тепла со стоком, приток тепловой энергии благодаря осадкам, выпадающим на водную поверхность, и сбросу промышленных и бытовых сточных вод. Хотя роль каждого из этих факторов теплового баланса не одинакова, наиболее важным является обмен теплом через открытую водную поверхность.

Прогнозы сроков вскрытия ледяного покрова основаны на вычислениях прочности тающего снежно-ледяного покрова с использованием уравнения теплового баланса и путем получения соотношения между

прочностью льда и силой разрушения, при которой происходит разлом ледяного покрова. Последняя является функцией расхода воды, уровня воды и интенсивности их изменений с течением времени.

Методы моделирования процессов образования и вскрытия ледяного покрова изложены в разделе 6.3.6.3 настоящего Руководства.

7.7.2 Долгосрочные ледовые прогнозы

Разработка методов долгосрочного прогнозирования ледовых явлений обычно включает следующие задачи:

- a) рассмотрение сроков образования и вскрытия льда на реках той территории, которая изучается, например средние даты, изменчивость ежегодных дат и разграничение районов с однородными ледовыми явлениями; основным математическим инструментом при этом является статистический анализ;
- b) синоптический анализ условий, которые приводят к образованию или вскрытию ледяного покрова, в соответствии с которыми северное полушарие делится на ряд характерных регионов. Основным математическим инструментом в данном случае — дискриминантный анализ;
- c) анализ распределения запасов тепла в верхних слоях океанов, например в Северной Атлантике или северной части Тихого океана; определение основных представляющих интерес зон, запасы тепла в пределах которых оказывают наибольшее воздействие на процессы, ведущие к образованию и разрушению ледового покрова на реках. Основным математическим инструментом при этом — дискриминантный анализ;
- d) определение количественных значений переменных, характеризующих атмосферные процессы и океанические поля, например путем расширения метеорологических и океанических полей ортогональными функциями;
- e) использование анализов корреляции для определения соотношения между временем появления льда и переменными, представляющими соответствующие метеорологические или океанические поля.

7.7.3 Ледовые заторы и методы прогнозирования высоких уровней воды

Опасные подъемы уровней воды, приводящие к паводкам, могут наблюдаться в период формирования ледяного покрова или ледяного зажора и в период вскрытия речного льда или затора. Вызванные зажорами льда паводки особенно опасны, потому что они возникают в холодный сезон и иногда очень продолжительны. Они формируют поле замерзшей воды, которое может покрыть заселенную территорию и

которое практически невозможно удалить. Часто резкое падение уровня воды происходит ниже зажора льда, ограничивая поступление воды в водозаборные сооружения и вызывая перерывы в водоснабжении.

На многих реках максимальные уровни воды, обусловленные зажорами льда, превышают уровни весеннего половодья и летних паводков. Зажоры могут образовываться в очень короткие сроки и вызвать очень быстрые подъемы уровней воды без сколь-либо существенного повышения водности реки.

Заторы льда чаще возникают на тех участках рек, где ледяной покров формируется в направлении от берегов к середине русла и вверх по течению. Чем медленнее развивается этот процесс, тем больше льда течение заносит под ледяной покров, вызывая уменьшение пропускной способности русла и подъем уровня воды на подходе к ледяному полю. Такие условия замерзания характерны для больших рек, текущих в направлении полюсов, и для рек, вытекающих из больших озер и нижних бьефов гидроэлектростанций.

Расходы воды в период замерзания, условия теплообмена, в т. ч. температура воздуха, и расположение кромки льда относительно поперечного сечения русла — это первичные факторы, которые необходимо принять во внимание при прогнозировании изменения уровней воды, обусловленного заторами льда.

Для некоторых рек, на которых часто наблюдаются заторы льда, построены физико-статистические зависимости, которые учитывают эти факторы. Нижеследующий пример касается реки Нева в Санкт-Петербурге (Бузин и др., 1989):

$$H_{затор} = 1,29H_{XI} + 0,53L + 0,24H_G - 404, \quad (7.15)$$

где H_{XI} — средний уровень Ладожского озера в ноябре, в сантиметрах; L — расстояние в километрах от кромки льда до поста наблюдений у Горного института; H_G — уровень воды в сантиметрах у этого поста.

Интересно, что зная только H_{XI} , можно выпускать достоверные предупреждения о высоких уровнях воды вследствие затора льда более чем за месяц, и обновлять эти прогнозы с заблаговременностью 3–5 дней, используя уравнение (7.15).

Для составления краткосрочных прогнозов максимальных уровней воды при заторе в пределах критических участков рек, в т. ч. для тех участков, по которым нет длинных временных рядов гидрологических наблюдений, применяется обобщенный метод. Необходимыми исходными данными являются уклон на данном участке реки, расход воды в день появления льда (Q_0), температура воздуха в течение периода замерзания

льда за последние несколько дней и кривая $Q = f(H)$ за период свободного ото льда русла. Для расчета прогноза необходимо определить значение критического градиента l' , задаваемого по формуле:

$$l' = 0,0154 g/c^2 (1 - e), \quad (7.16)$$

где g — ускорение свободного падения; c — коэффициент Шези; e — пористость льда, определяемая в зависимости от температуры воздуха, когда $e = 0,25$ при $\theta = -10^\circ\text{C}$ и $e = 0,55$ при $\theta = -2^\circ\text{C}$.

Если используется уравнение (7.16), то по разнице между l' и уклоном открытой водной поверхности с помощью специальной таблицы, построенной для каждого гидрологического поста с привлечением данных гидрологических наблюдений, можно определить k_p — безразмерный зимний коэффициент для перехода между зимним расходом воды и соответствующим ему расходом воды в период открытого русла. Значение расхода Q_{kr} вычисляется по следующей формуле:

$$Q_{kr} = Q_0 e^{-k_0 T_{лед}}, \quad (7.17)$$

где k_0 зависит от погодных условий в период замерзания; $T_{лед}$ — продолжительность периода ледового покрова в днях. Например, коэффициент k_0 для реки Амур может быть рассчитан по уравнению:

$$k_0 = 0,005 - 0,00333T_{XI}. \quad (7.18)$$

T_{XI} — средняя температура воздуха в Хабаровске в октябре.

Максимальный уровень воды при ледовом заторе определяется с помощью уменьшенного расхода Q' (гипотетический летний расход воды, который вызывает увеличение уровня воды и может вызвать затор зимой) и кривой летнего расхода $Q = f(H)$. В этом случае необходимо вычислить уменьшенный расход Q' , который приближенно можно получить по формуле:

$$Q' = \frac{Q_{kr}}{k_p}. \quad (7.19)$$

Весенние заторы льда на нижних участках рек разрушаются под действием вод весеннего половодья с верховьев бассейна. Это явление имеет особенно важное значение для рек, текущих с юга на север в Канаде, северных районах Европы и Российской Федерации. Разрушение льда на таких реках происходит последовательно по принципу цепной реакции, вызывая разрушение заторов льда различной величины.

Максимальный заторный уровень воды на данном участке реки зависит от многих факторов, которые можно разделить в зависимости от их влияния на

процесс формирования льда или его разрушения. Самые мощные заторы и катастрофические паводки наблюдаются в период формирования ледяного покрова. Это происходит, когда высокие осенние стоки подходят к забитому шугой руслу реки, особенно если замерзание сопровождается некоторым перемещением ледяного покрова (Бужин и др., 1989). Это также может наблюдаться и в период весеннего половодья, когда быстрое увеличение стока на верхних участках реки совпадает по времени с резким похолоданием, в результате чего лед становится очень прочным и формирует затор ниже по течению.

На некоторых реках, например Амуре, Ангаре и Сухоне, факторы первой группы позволяют прогнозировать максимальные заторные уровни воды на отдельных участках с заблаговременностью 1–4 месяца, используя для этого следующее уравнение:

$$H_{t, \text{затор}} = 180 + 2,18 H_x, \quad (7.20)$$

где $H_{t, \text{затор}}$ — максимальный уровень воды при заторе, в сантиметрах; H_x — уровень воды в период образования льда, в сантиметрах.

Кроме того, в бассейне реки Лена характеристики формирования ледяного покрова, будучи связанными как параметры с особенностями протекания весенних процессов, позволяют прогнозировать вероятность появления вследствие заторов льда опасных уровней воды в период разрушения ледяного покрова для каждого из четырех основных участков реки с заблаговременностью 20–40 дней. Используя соотношение между толщиной льда выше основного створа и толщиной льда в этом створе в пределах города, можно прогнозировать, будет ли затор угрожать городу или будет формироваться в другом месте. Оправдываемость прогнозов опасных уровней составляет 80 процентов.

Однако для многих рек, где ледяные заторы представляют собой особую угрозу, разработка методов долгосрочного прогнозирования довольно проблематична, и там, где эти прогнозы выпускаются, они нередко требуют корректировки. По этой причине разработан ряд методов краткосрочного прогнозирования для рек, где заторы происходят каждый год. В основе этих прогнозов лежат физические и статистические отношения, учитывающие факторы, которые были перечислены выше. В ряде случаев при оценивании характеристик прочности льда и возможности похолодания учитывается прогноз погоды на 3–5 дней.

Некоторые рекомендуемые методы касаются прогнозирования уровней воды при ледяном заторе для любого участка реки, даже при отсутствии длинного ряда данных наблюдений. В таких случаях для вычисления соответствующих характеристик прочности

льда можно использовать кривую расходов $Q = f(H)$ и локальные метеорологические данные. Максимальный уровень воды в месте ледяного затора определяется по $Q = f(H)$, и соответствующее значение Q рассчитывается по уравнению (7.19). В этом случае Q — это условный летний расход, который может вызвать такой подъем уровня воды в реке, который наблюдается при формировании затора. В уравнении (7.19) k_p — это зимний коэффициент для периода образования ледяного затора. Этот коэффициент k_p выводится в зависимости от характеристик ледяного покрова, выраженных следующим уравнением:

$$k_p = 8,13 \left(\frac{\varphi h_{\text{лед}}}{B} \right)^{0,38} (k_{\text{лед}} - 1) + 1, \quad (7.21)$$

где φ выводится в зависимости от характеристик ледяного покрова, выраженных следующим уравнением; $h_{\text{лед}}$ — толщина льда в метрах перед разрушением ледяного покрова; B — ширина русла реки в метрах; $k_{\text{лед}}$ — зимний коэффициент для максимального уровня воды в начальный период осеннего замерзания (для различных речных бассейнов $k_{\text{лед}} = 0,65-0,85$). Зимний коэффициент также может быть рассчитан по следующей формуле:

$$k_{\text{лед}} = 1 - \frac{1}{1,1 - 1 \log g F}, \quad (7.22)$$

где F — площадь водосбора выше ледяного затора, км².

Если выше затора отсутствуют речные притоки и имеется гидрологический пост на участке реки (рисунок II.7.9), для прогноза расхода воды (Q_{kr1}) в створе затора возможно использовать метод эквивалента применительно к поэтапному расходу льда:

$$Q_{kr1} = k_{p2} Q_{kr2} F_1/F_2, \quad (7.23)$$

где k_{p2} — зимний коэффициент на дату формирования ледяного затора в верхнем створе; Q_{kr2} — расход на верхнем створе, соответствующий максимальному уровню воды по летней кривой расходов $Q = f(H)$; и F_1 и F_2 — площади водосбора, закрытого верхней и нижней частями створа $F_1 = F_2 + \Delta F$.

Полезная информация о гидрологических прогностических службах содержится на следующих веб-сайтах:

- <http://edc.usgs.gov/>
- <http://k12science.ati.stevens-tech.edu/curriculum/drainproj/reference.html>
- <http://nsidc.org/snow/>
- <http://snr.unl.edu/niwr/>
- <http://ulysses.atmos.colostate.edu/~odie/snowtxt.html>
- <http://water.usgs.gov/>
- <http://water.usgs.gov/listurl.html>
- <http://www.afws.net/>

http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/expert_assessment/threats.shtml
<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/fews/>
<http://www.dartmouth.edu/artsci/geog/floods/>
<http://www.epa.gov/ebtpages/water.html>
<http://www.hpc.ncep.noaa.gov/nationalfloodoutlook/>
<http://www.ibwc.state.gov/wad/rtdata.htm>
<http://www.iwr.usace.army.mil/>
<http://www.msc.ec.gc.ca/crysys/>
<http://www.ncdc.noaa.gov/ol/climate/climateextremes.html>
<http://www.nohrsc.nws.gov/>
<http://www.nws.noaa.gov/oh/hads/>
<http://www.nws.noaa.gov/ohd/hdsc/>
<http://www.nwstc.noaa.gov/HYDRO/RFS/NWSRFS.html>
http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/
http://www.sce.ait.ac.th/programs/courses/IWRM/Online_references.htm
<http://www.worldclimate.com/>
<http://www.wri.org/watersheds/>

Ссылки и дополнительная литература

- Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов, Гидрометеиздат, Ленинград, 1974. с. 418.
- Боровикова, Л.Н., Денисов Ю.М., Трофимова Е.Б., Шенцис И.Д. Математическое моделирование процесса стока горных рек. Труды СредАзНИГМИ, 1972. Вып. 61(76).
- Борщ С.В., Силантьева Т.П., 1987: Метод краткосрочного и среднесрочного прогноза вскрытия рек на основе обобщенной зависимости. Методические рекомендации. Москва, Гидрометцентр СССР, с. 28.
- , 1989: Усовершенствование метода учета разрушения ледяного покрова на реках и водохранилищах. Труды Гидрометцентра СССР. Вып. 309, сс. 113–120.
- Бузин В.А., Болотников Г.И., Филиппов А.М. Затопления на реках — методы изучения, расчета и прогноза. В книге: Проблемы современной гидрологии. Гидрометеиздат, Ленинград, 1989. сс. 220–231.

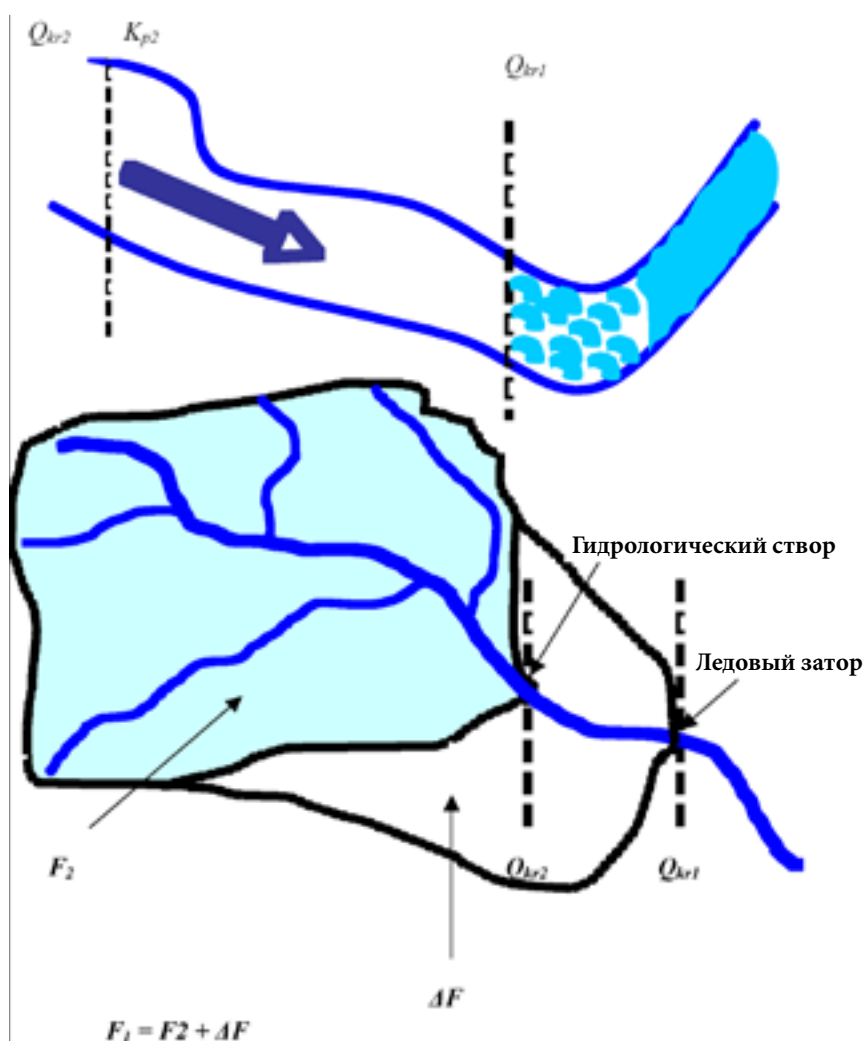


Рисунок II.7.9. Речной плёс с ледовым затором

- Гинзбург Б.М., Борщ С.В., Ефремова Н.Д. Методы фонового долгосрочного и среднесрочного прогноза сроков вскрытия рек европейской территории России. // *Метеорология и гидрология*, 2001, № 11, сс. 67-78.
- Гинзбург Б.М., Борщ С.В., Ефремова Н.Д., Сильницкая М.И. Метод фонового долгосрочного прогноза сроков начала замерзания рек и водохранилищ европейской территории России и Белоруссии. // *Метеорология и гидрология*, 1998, № 6, сс. 84-91.
- Гинзбург Б.М., Борщ С.В., Ефремова Н.Д., Сильницкая М.И., Полякова К.Н. Методы долгосрочного и среднесрочного прогноза сроков прохождения максимального уровня весеннего половодья на реках европейской территории России. // *Метеорология и гидрология*, 2002, № 11, сс. 81-92.
- Гинзбург Б.М., Сильницкая М.И. // Влияние распределения температуры поверхности океанов на сроки вскрытия рек европейской территории России. // *Метеорология и гидрология*, 2000, № 6, сс. 86-91.
- Руководство по гидрологическим прогнозам. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. Том 3. Гидрометеиздат, Ленинград, 1989. с. 168.
- Всемирная Метеорологическая Организация, 1994: *Руководство по гидрологической практике*. Пятое издание, ВМО-№ 168, Женева. сс. 721-724.
- Anderson, E. A., 1973: National Weather Service River Forecast System: Snow Accumulation and Ablation Model, Programs and Test Data. NOAA NWSHYDRO Technical Memorandum 17.
- Barrett, C.B., 1999: Successful Development and Engineering of Global Integrated Water Management Systems. American Society of Civil Engineers, International Activities Committee, Roundtable Discussion paper, Washington, DC, 1999.
- , 2003: WMO-NOAA Hydrologic Forecasting Course, 14 October-7 November 2003, Kansas City, Kansas.
- Barrett, C.B. and others, 1985: Hydrology Subcommittee of the Interagency Advisory Committee on Water Data, Guidelines on Community Local Flood Warning and Response Systems, Springfield, 1985.
- Bellerby, T., M. Todd, D. Kniveton and C. Kidd, 2001: Rainfall estimation from a combination of TRMM precipitation radar and GOES multispectral satellite imagery through the use of an artificial neural network. *Journal of Applied Meteorology*, 39(12):2115-2128.
- Bergstroem, S., 1976: Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments. SMHI Rapport No. RH07, *Hydrological Oceanography*.
- Beven, K., 2002. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. *Hydrological Processes*, 16:189-206.
- Box, G.E.P. and G.M. Jenkins, 1976: Time-series analysis: Forecasting and Control. San Francisco, Holden-Day.
- Braga, B., Jr. and O. Massambani, (eds.) 1997: Weather Radar Technology for Water Resources Management. Montevideo, UNESCO Press, 516 pp.
- Brier, G.W. and R.A. Allen, 1951: Verification of Weather Forecasts. Compendium of Meteorology, (T.F. Malone, ed.) *American Meteorological Society*, pp. 841-848.
- Brun, E., P. David, M. Sudak and G. Brunot, 1992; A numerical Model to Simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting, *Journal of Glaciology*, 38(128):13-22.
- Carpenter, T.M. and K.P. Georgakakos, 2004: Impacts of parametric and radar rainfall uncertainty on the ensemble streamflow simulations of a distributed hydrologic model. *Journal of Hydrology* (in press).
- Carpenter, T.M., K.P. Georgakakos and J.A. Sperflage, 2001: On the parametric and NEXRAD-radar sensitivities of a distributed hydrologic model suitable for operational use. *Journal of Hydrology*, 254:169-193.
- Carpenter, T.M., J.A. Sperflage, K.P. Georgakakos, T. Sweeney and D.L. Fread, 1999: National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems. *Journal of Hydrology*, 224:21-44.
- Carroll, T. R., 1995: Remote-sensing of snow in the cold regions. 1995. First Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Snow and Ice Workshop; NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland. 3-14.
- Chagnon, S.A., 1999: Record flood-producing rainstorms of 17-18 July 1996 in the Chicago metropolitan area. Part III, Impacts and responses to the flash flooding. *Journal of Applied Meteorology*, 38:273-280.
- Cluckie, I.D. and C.G. Collier, eds, (1991): Hydrological Applications of Weather Radar, Environmental Management, Science and Technology Series, Chichester, Ellis Horwood, 644 pp.
- Cluckie, I.D. and D. Han, 2000: Fluvial Flood Forecasting, *Journal of Water and Environmental Management*. 14(8) Chartered Institution of Water and Environmental Management (CIWEM).
- Colbeck, S.C. (ed), 1980: *Dynamics of Snow and Ice Masses*. New York, Academic Press, pp. 305-395.
- Collier, C.G. and R. Krzysztofowicz, 2000: Special Issue on Quantitative Precipitation Forecasting. *Journal of Hydrology*, 239:1-337.
- Collinge, V.K. and C. Kirby (eds), 1987: *Weather Radar and Flood Forecasting*. New York, Wiley, 296 pp.
- Dabberdt, W.F., J. Hales, S. Zubrick, A. Crook, W. Krajewski, J. Christopher Doran, C. Mueller, C. King, R.N. Keener, R. Bornstein, D. Rodenhuis, P. Kocin, M.A. Rossetti, F. Sharrocks and E.M. Stanley Sr, 2000: Forecast issues in the urban zone, Report of the 10th Prospectus Development team of the U.S. Weather Research Program. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(9):2047-2064.
- Donald J.R., E.D. Soulis, N. Kouwen and A. Pietroniro, 1995: A land cover-based snow cover representation for distributed hydrologic models. *Water Resources Research*, 31:(4):995-1009.
- Draper, N.R. and H. Smith, 1966: *Applied Regression Analysis*. New York, Wiley.
- Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a non-linear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to

- forecast error statistics, *Journal of Geophysical Research*, 90(C5):10143–10162.
- Finnerty, B.D., M.B. Smith, D.-J. Seo, V. Koren and M.G. Moglen, 1997. Space-time sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs, *Journal of Hydrology*, 203:21–38.
- Fleming, G., 1975: *Computer Simulation Techniques in Hydrology*. New York, Elsevier.
- Fulton, R.A., J.P. Breidenbach, D.-J. Seo and D.A. Miller, 1998: The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather and Forecasting*, 13(2):377–395.
- Georgakakos, K.P., 2002: US corporate technology transfer in hydrometeorology. *Journal of Hydroinformatics*, 4(1):3–13.
- Georgakakos, K.P., 2004: Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology* (in review).
- Georgakakos, K.P. and J.A. Sperflage, 2004: Operational rainfall and flow forecasting for the Panama Canal watershed. Chapter 16 in *Rio Chagres, A Multidisciplinary Profile of a Tropical Watershed* (R.S. Harmon (ed.)). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 16.1–16.13 (in press).
- Georgakakos, K.P. and W.F. Krajewski (eds.), 2000: Hydrologic Applications of Weather Radar. Special Issue of *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 105(D2):2213–2313.
- Ginzburg B.M., S.V. Borsch and N.D. Efremova, 2001: Methods of the background long-range and medium-range forecasting of dates of opening of the rivers of the European territory of Russia. *Journal of Meteorology and Hydrology*, 11:67–78.
- Gray, D.M. and D.H. Male (Eds.), 1981: *Handbook of Snow: Principles, Processes, Management and Use*. Toronto, Pergamon Press.
- Hedstrom, N.R. and J.W. Pomeroy, 1998: Measurements and modelling of snow interception in the boreal forest. *Hydrological Processes*, 12(10–11):1611–1625.4.
- Jelesnianski, C.P., 1974: SPLASH II: General Track and Variant Storm Conditions. NOAA Technical Memorandum, NWS, TDL-S2. US Department of Commerce, March.
- Joliffe, T. Ian and B.D. Stephenson, 2003: *Forecast Verification A Practitioner's Guide in the Atmospheric Sciences*. Wiley, 240 pp.
- Jones, H.G., J. Pomeroy, D.A. Walker and R.W. Hoham, 2001: *Snow Ecology: an interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems*. Cambridge University Press, 377 pp.
- Koren, V.I., B.D. Finnerty, J.C. Schaake, M.B. Smith, D.-J. Seo and Q.Y. Duan, 1999: Scale dependencies of hydrology models to spatial variability of precipitation. *Journal of Hydrology*, 217:285–302.
- Kottogoda, N.T., 1980: *Stochastic Water Resources Technology*, London, Macmillan Press.
- Kovar, K., and H.P. Nachtnebel (eds), 1996: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management. IAHS Publication No. 235. Wallingford, IAHS Press, Institute of Hydrology, 711 pp.
- Krzysztofowicz, R., 1992: Bayesian correlation score: a utilitarian measure of forecast skill. *Monthly Weather Review*, 120:208–219.
- Kummerow, C., W. Barnes, T. Kozu, J. Shiue and J. Simpson, 1998: The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(3):809–817.
- Kuo, C.Y. (ed.), 1993: *Engineering Hydrology*. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 989–994.
- Mogil, H.M., J.C. Monro and H.S. Groper, 1978: NWS flash flood warning and disaster preparedness programs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 59:690–699.
- Munich Re, 2001: Topics, Annual Review: Natural Catastrophes 2000, Munich.
- Murphy, A.H. and R.L. Winkler, 1987: A general framework for forecast verification. *Monthly Weather Review*, 115:1330–1338.
- Murphy, A.H., 1988: Skill scores based on the mean square error and their relationships to the correlation coefficient. *Monthly Weather Review*, 116:2417–2424.
- Murphy, A.H., 1996: General decompositions of MSE-based skill scores: measures of some basic aspects of forecast quality. *Weather and Forecasting*, 12:2353–2369.
- National Oceanic and Atmospheric Administration and the United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2004: *Guidelines for Reducing Flood Losses*, 87 pp.
- National Research Council (NRC), 1991: *Opportunities in the Hydrologic Sciences*. Washington, DC, National Academy Press, 348 pp.
- Ogden, F.L., J. Garbrecht, P.A. DeBarry and L.E. Johnson, 2001: GIS and distributed watershed models, II, Modules, interfaces and models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(6):515–523.
- Overland, J.E., 1975: Estimation of Hurricane Storm Surge in Apalachicola Bay, Florida. NOAA Technical Memorandum, NWS-17, US Department of Commerce, March.
- Palmer, W.C., 1965: Meteorological Drought, Research Paper No. 45, US Weather Bureau. Washington, DC.
- Pielke, R.A., Jr and M.W. Downton, 2000: Precipitation and damaging floods, Trends in the United States, 1932–1997. *Journal of Climate*, 13:3625–3637.
- Pomeroy, J.W. and D.M. Gray (eds.), 1995: *Snowcover Accumulation, Relocation and Management*. National Hydrology Research Centre, Saskatoon, Sask. Canada. NHRI Science Report No. 7, 144 pp.
- Pomeroy, J.W. and E. Brun, 2001: Physical Properties of Snow. In: *Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-covered Ecosystems*. (H.G. Jones, J.W. Pomeroy, D.A. Walker, R.W. Hoham, eds). Cambridge, Cambridge University Press, pp. 45–126.
- Rango, A., J. Martinec, J. Foster and D. Marks, 1983: Resolution in operational remote-sensing of snow cover. Hydrological Applications of Remote-sensing and Remote Data Transmission, Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983. IAHS Publ. No. 145.
- Riccardi, G.A., E.D. Zimmermann and R.-A. Navarro, 1997: Zonification of areas with inundation risk by means of mathematical modelling in the Rosario region Argentina. In: *Destructive Water, Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control* (G.H. Leavesley, H.F. Lins, F. Nobilis, R.S. Parker, V.R. Schneider, F.H.M. van de Ven, eds). IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, 123–135.

- Seo, D.-J. and J.P. Breidenbach, 2002: Real-time correction of spatially nonuniform bias in radar rainfall data using rain gauge measurements. *Journal of Hydrometeorology*, 3(2):93–111.
- Shi, J.C., J. Dozier and H. Rott, 1994: Snow Mapping in Alpine Regions with Synthetic Aperture Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote-sensing*, 31(1):152–158.
- Sittner, W.T. and K.M. Krouse, 1979: Improvement of Hydrologic Simulation by Utilizing Observed Discharge as an Indirect Input (Computed Hydrograph Adjustment Technique – CHAT). NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO-38, February, US Department of Commerce.
- Sittner, W.T., C.F. Schauss and J.C. Monro, 1969: Continuous hydrograph synthesis with an API-type hydrological model. *Water Resources Research*, 5(5).
- Smith, M.B., K.P. Georgakakos and X. Liang, (eds), 2004a: The Distributed Model Intercomparison Project (DMIP). Special Issue of *Journal of Hydrology* (in press).
- Smith, M.B., D.-J. Seo, V.I. Koren and co-authors, 2004b: The Distributed Model Intercomparison Project (DMIP): An Overview. *Journal of Hydrology* (in press).
- Sweeney, T.L., 1992: Modernized areal flash flood guidance. NOAA Technical Report NWS HYDRO 44, Hydrology Laboratory, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD, October, 21 pp. and an appendix.
- Tachikawa, Y., B.E. Vieux, K.P. Georgakakos and E. Nakakita (eds), 2003: *Weather Radar Information and Distributed Hydrological Modelling*. IAHS Publications No. 282. Wallingford, IAHS Press, 323 pp.
- Todini, E. and J.R. Wallis, 1978: A Real-time Rainfall Runoff Model for an On-line Flood Warning System. AGU Chapman conference on applications of kalman filtering theory and techniques to hydrology, hydraulics and water resources, Pittsburgh, Pennsylvania, 22–24 May 1978.
- Twedt, T.M., J.C. Schaake and E.L. Peck, 1977: National Weather Service extended streamflow prediction. *Proceedings of the western snow conference*, Albuquerque, New Mexico, 19–21 April 1977.
- US Bureau of Reclamation, 1960: Design of Small Dams. Appendix A, Washington, DC, pp. 413–431.
- US Department of Commerce, 2002: Final Report on Hurricane Reconstruction Program, Central American and the Dominican Republic, May 2002.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1991: International Workshop on Storm Surges, River Flow and Combined Effects. 8–12 April 1991, Hamburg, A contribution to the UNESCO-IHP project H-2-2.
- Urbanas, B.R. and L.A. Roesner, 1993: Hydrologic design for urban drainage and flood control. In: *Handbook of Hydrology* (D.R. Maidment, ed.), New York, McGraw-Hill Inc., 28.1–28.52.
- Weaver, J.F., E. Gruntfest and G.M. Levy, 2000: Two floods in Fort Collins, Colorado, Learning from a natural disaster. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(10):2359–2366.
- World Bank, 2002: *2002 World Development Indicators*. Washington, DC, World Bank, 405 pp.
- World Meteorological Organization, 1969: *Hydrological Forecasting*, Technical Note No. 92, WMO-No. 228, Geneva.
- , 1975: *Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting*. Operational Hydrology Report No. 7, WMO-No. 429, Geneva.
- , 1982: *Long-range Water-supply Forecasting*, edited by M. Dyhr-Nielsen. Operational Hydrology Report No. 20, WMO-No. 587, Geneva.
- , 1986: *Intercomparison of Models of Snowmelt Runoff*, WMO-No. 646, Geneva, Switzerland.
- , 1990: *Hydrological Models for Water Resources System Design and Operation*. Operational Hydrology Report No. 34, WMO-No. 740, Geneva.
- , 1992: *Simulated Real-time Intercomparison of Hydrological Models*. Operational Hydrology Report No. 38, WMO-No. 779, Geneva.
- and the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1997: *The World's Water, Is there enough?*.
- Young, P.C., 1993: *Concise Encyclopaedia of Environmental Systems*, Pergamon Press, pp. 22.

www.wmo.int

P-CLW_9607