Высшее профессиональное образование

Ю. Б. Виноградов
Т. А. Виноградова

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИИ

Учебное пособие

Естественные науки

ACADEMA

ВЫСШЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Ю. Б. ВИНОГРАДОВ, Т. А. ВИНОГРАДОВА

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИИ

Учебное пособие
для студентов высших
учебных заведений

ACADEMA

Москва
Издательский центр «Академия»
2008

УДК 556(075.8)
ББК 26.22я73
В493

Рецензенты:
д-р геогр. наук, проф. *Н. И. Алексеевский* (МГУ им. М. В. Ломоносова);
д-р техн. наук, проф. *Н. Б. Барышников* (зав. кафедрой гидрометрии Российского гидрометеорологического университета)

Виноградов Ю. Б.

В493 Современные проблемы гидрологии : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Ю. Б. Виноградов, Т. А. Виноградова. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 320 с.

ISBN 978-5-7695-3924-4

В пособии изложены современные взгляды на гидрологию как науку, изучающую природные процессы на земной суше, происходящие с водой, в воде или с участием воды. Рассмотрены методологические, экспериментальные, физические, математические и другие аспекты гидрологии, а также ее основные концепции. Обсуждена главная проблема гидрологии — формирование речного стока. Приведены сведения об основных гидрологических объектах, расположенных на поверхности суши и принимающих участие в формировании стока. Рассмотрены опасные гидрологические явления.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 556(075.8)
ББК 26.22я73

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А., 2008
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2008
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2008

ISBN 978-5-7695-3924-4

Все хорошо в природе, но вода — красота всей природы. Вода жива; она бежит или волнуется ветром; она движется и дает жизнь всему окружающему. Разнообразны явления вод, и не понятны законы этого разнообразия.

С. Т. Аксаков. Записки ружейного охотника Оренбургской губернии

ПРЕДИСЛОВИЕ

Большие успехи в гидрологии, достигнутые за последние полвека, практически еще не нашли своего отображения в учебниках для студентов и аспирантов, специализирующихся по данной или смежным специальностям. Такому положению вещей в немалой степени способствовало правило соответствия содержания учебников учебным программам. Поэтому многие преподаватели вынуждены читать свои курсы, не ориентируясь на устаревшие учебники и программы, или же наоборот, приспосабливаясь к ним. Наиболее безобидный путь для изменения ситуации — отображение новых тенденций в гидрологии в рамках нескольких учебных пособий, при создании которых (по сравнению с учебниками) авторам предоставлена бóльшая степень свободы.

Планируется последовательное издание трех книг: «Современные проблемы гидрологии», «Прикладная гидрология», «Математическое моделирование в гидрологии».

Данная книга, как это и следует из названия, является попыткой ввести наших читателей в круг проблем и задач гидрологии. Последняя постоянно изменяется, появляются новые направления, методологии, приоритеты. И придерживаться традиционной структуры и идеологии старых учебников по гидрологии, по которым мы учились сами 30—50 лет назад, вряд ли допустимо.

Мы не избегаем и полемических аспектов, хотя и не стараемся их обострить, и везде отдаем предпочтение, где это необходимо, аналитическому подходу перед чисто описательным. От студентов это потребует более серьезных усилий и более глубоких познаний физики и математики. Но иначе продвижение вперед будет затруднено.

Гидрология приобретает все возрастающее значение при решении задач научного обоснования строительного и экологического проектирования, правильного земле- и водопользования, охраны природной среды, энергетических, водохозяйственных и коммуникационных проектов. Другая немаловажная область ее приложений — это прогнозы речного стока и опасных гидрологических явлений, таких как наводнения, селевые потоки, катастрофиче-

ские обвалы и лавины в горах, загрязнение территорий и речного стока.

Гидрология — один из важнейших научных элементов системы жизнеобеспечения человечества.

Символ гидрологии

Авторы данного учебного пособия связали свои жизни с гидрологией и никогда об этом не пожалели. Мы любим эту науку и желаем всем, кто берется за ее изучение и дальнейшее развитие, получить от этого такое же удовольствие, какое выпало на нашу долю.

ГЛАВА 1
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГИДРОЛОГИИ

1.1. Вода на Земле

Чтобы здраво рассуждать обо всех аспектах присутствия вещества H_2O на Земле, полезно сначала привести некоторые цифры, характеризующие нашу планету в целом [8, 17]:

- диаметр 12 756 км;
- объем 1 083 млрд км^3;
- масса $5{,}976 \cdot 10^{24}$ кг;
- средняя плотность 5 518 кг/м^3;
- плотность внешней части земной коры 2 800 кг/м^3;
- площадь поверхности 510 млн км^2;
- площадь поверхности Мирового океана 361 млн км^2 (70,8 %);
- площадь поверхности суши 149 млн км^2 (29,2 %).

Вода пребывает на Земле в самом различном состоянии в зависимости от мест своего сосредоточения. Основная ее масса содержится в трех макроструктурных элементах планеты.

1. В мантии Земли — оболочке планеты, находящейся между ядром и земной корой, т.е. примерно между глубинами 30—50 км и 2 900 км от поверхности, по разным гипотетическим оценкам, может присутствовать от 13—15 до 28 млрд км^3 воды. Современное ежегодное поступление этой воды, называемой ювенильной, из глубин Земли в подземные воды составляет ≈ 1 км^3.

2. В толще земной коры — верхней части литосферы мощностью примерно от 5—20 км под самыми глубокими океаническими впадинами до 40—50 км под высочайшими горными хребтами суши, по разным источникам, содержится от 1,0 до 1,9 млрд км^3 воды (свободной, адсорбированной, кристаллизационной).

3. В Мировом океане находится около 1 320—1 370 млн км^3 воды, а с учетом воды, содержащейся в илистых донных отложениях, 1 470—1 480 млн км^3. Средняя глубина Мирового океана составляет около 3 700—3 750 м.

Что же касается территории суши, воды которой являются объектом изучения гидрологии, то здесь мы имеем следующую картину:

- средняя высота поверхности суши над уровнем моря около 875 м;

• подземные воды до глубины 200 м — 23—24 млн км^3 (очень условная оценка); из них 200—500 тыс. км^3 — подземный лед (многолетняя мерзлота);

• вода в озерах — около 180 тыс. км^3 (площадь около 2,1 млн км^2);

• вода в болотах — около 12 тыс. км^3 (площадь около 2,7 млн км^2);

• запасы воды в верхнем почвенном горизонте (до 2 м) — около 16—17 тыс. км^3;

• вода живых организмов биосферы — около 1,1 тыс. км^3.

Следует обратить внимание на присутствие льда на поверхности суши. Количество его огромно по сравнению с объемом воды на континентах и островах. Естественно, что льда много в высоких широтах и совсем мало в низких. Но здесь вступает в действие высота местности, способствующая введению некоторых, хотя и не очень больших, территорий в мир холода.

Приводимые ниже цифры округлены, чтобы не создавать иллюзию их высокой точности. Они следуют в таком порядке: объем льда, площадь, покрытая льдом, средняя толщина льда на этой площади.

Антарктида: 30,1 млн км^3, 13,6 млн км^2, 2210 м;

Гренландия: 3,05 млн км^3, 1,80 млн км^2, 1690 м;

Канадский арктический архипелаг: 54 тыс. км^3, 150 тыс. км^2, 360 м;

Евразия: 41 тыс. км^3, 229 тыс. км^2, 180 м;

Северная Америка: (50—80) тыс. км^3, 154 тыс. км^2, 300—500 м;

Южная Америка: (5—7) тыс. км^3, 33 тыс. км^2, 150—200 м;

Остальная территория — около 1 тыс. км^2.

Таким образом, на земной суше общее количество льда, залегающего на площади 16,2 млн км^2 со средней глубиной около 2000 м, приближенно составляет 33,3 млн км^3.

1.2. Уникальные свойства воды

Вода. Лед. Снег ... Они всю жизнь так или иначе сопутствуют нам.

«Вода — самое важное химическое вещество. Она — главный компонент живых организмов и той среды, где живет человек. Физические свойства воды резко отличаются от свойств других веществ, и характер этих различий определяет природу физического и биологического мира». Эта краткая преамбула заимствована нами у химиков (Л. Полинг, П. Полинг. Химия. М., 1978), которых трудно подозревать в пристрастии к воде, естественном для гидрологов.

Вода — это светлая прозрачная жидкость, бесцветная в малых объемах и приобретающая голубовато-зеленоватую окраску своей

толщи. Лед тоже прозрачен, ибо коэффициент поглощения им света в видимой части спектра практически равен нулю, однако это не относится к ультрафиолетовой и инфракрасной областям. На сколах крупных глыб глетчерного и речного льда он, как и вода, имеет голубые и зеленоватые оттенки.

Свойства воды наложили отпечаток на избранную нами систему физических констант и единиц измерения: температура замерзания воды — плавления льда принята за 0 °С, а температура кипения воды за 100 °С (то и другое при атмосферном давлении около 1013 мбар = 101,3 кПа = 760,6 мм рт. ст.). Единица объема в метрической системе выбрана из условия, что 1 $м^3$ воды при температуре 3,98 °С имеет массу 1000 кг.

Для того чтобы разобраться в подлинных причинах уникальности воды как химического вещества, играющего на нашей планете столь важную роль, нам придется заглянуть в молекулярный мир.

Сначала несколько слов о водороде. У него нет аналогов: ядро водорода — элементарная частица. У любого другого элемента всегда имеется электронная оболочка, несущая отрицательный заряд и экранирующая ядро. Ион же водорода — это «голый» протон, и он может притягиваться к электронным оболочкам других атомов, испытывая при этом не особо сильное отталкивание от ядра. Теперь рассмотрим кислород. Когда атом водорода одной молекулы воды приближается к атому кислорода другой ее молекулы, то между протоном и электронной оболочкой кислорода начинает действовать сила дополнительного притяжения, и образуется особая, так называемая водородная связь. Такие связи раз в двадцать слабее обычных внутримолекулярных, но роль их огромна. О вкладе кислорода в уникальные свойства воды остановимся чуть ниже при обсуждении его особых отношений с водородом.

Молекула H_2O — простейшее устойчивое соединение водорода с кислородом. Структура ее такова: три ядра (два водородных и одно кислородное) образуют равнобедренный треугольник — два протона в его основании и атом кислорода в вершине. Из имеющихся в молекуле пяти пар электронов одна сосредоточена вблизи атома кислорода (внутренние электроны), еще по одной находятся во взаимодействии одновременно с одним из двух протонов и ядром атома кислорода, и наконец, две последние тяготеют к удаленным от протонов вершинам тетраэдра (треугольной пирамиды). Таким образом, в молекуле воды имеется четыре полюса зарядов, расположенных в вершинах тетраэдра: два отрицательных (из-за близости скопления «обобществленных» пар электронов) и два положительных (из-за дефицита электронов вблизи «оголенных» протонов). Молекула воды по своим размерам равновелика шару диаметром $3 \cdot 10^{-10}$ м (0,3 нанометра). При фазовых

переходах молекула воды слегка деформируется, даже внутримолекулярные расстояния несколько сокращаются в направлении от льда к пару. Показателем такой деформации может служить изменение угла между линиями связей НОН: лед — 109,5° (так называемый тетраэдрический угол), вода 105°03′, пар 104°27′.

Действительно, вода играет основную роль в уникальности плана творения природы. Гидрологический цикл — круговорот воды в природе — во всей своей полноте и мощи возможен только в силу того, что условия на поверхности нашей планеты, определяемые в первую очередь давлением и температурой, случайно или не случайно, но попадают в окрестности так называемой «тройной точки». Последняя есть некое термодинамическое понятие и соответствует геометрической точке на диаграмме состояния (в координатах давление — температура), представляющей собой три линии, исходящие из названной точки и разделяющие области существования фазовых состояний воды — твердого, жидкого и газообразного. «Тройная точка» для воды имеет четкие координаты: 0,01 °С и 6,106 мбар = 610,6 Па = 4,59 мм рт. ст. и соответствует равновесию трех названных фаз (рис. 1.1). Обращаем внимание на то, что понятие «сублимация» в физике — это процесс прямо-

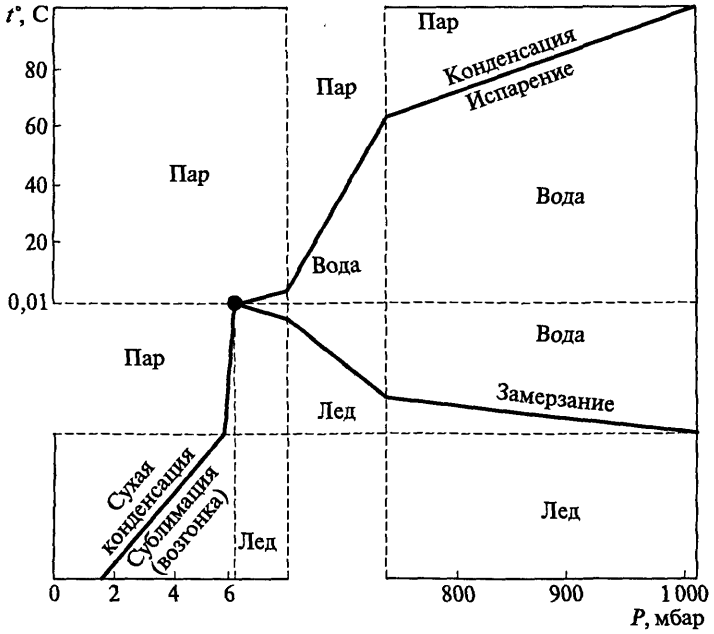
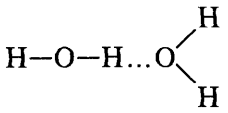


Рис. 1.1. Диаграмма состояния воды и «тройная точка».
Следует обратить внимание на изменение масштаба, разделяемое полосами «разрыва»

го перехода льда в пар, минуя состояние жидкой фазы (воды). В то же время в метеорологии и гляциологии по неизвестным причинам под этим определением понимается обратный процесс — переход воды из парообразного состояния в твердое.

Однако фундаментальная причина именно такой ситуации и вообще всех необычных свойств воды кроется в достаточно сильном взаимном притяжении ее молекул. Такое взаимодействие присуще химическим структурам с водородной связью. Последней, как это было уже упомянуто ранее, называют притяжение между атомом водорода одной молекулы и электроотрицательным атомом другой молекулы. Электроотрицательность — это способность атома, участвующего в ковалентной связи (связи общей пары электронов двух атомов), притягивать к себе электроны. Кислород является одним из самых сильных электроотрицательных элементов, уступая в этом только фтору. Вода — особенно подходящее вещество для образования водородной связи, так как каждая ее молекула имеет два атома водорода и две не поделенные электронные пары и тем самым может образовать четыре водородные связи. Последние осуществляются с участием атома водорода, расположенного либо между молекулами, либо между атомами внутри молекулы:



Водородная связь объясняется тем, что электрон атома водорода слабо связан с протоном и легко смещается к электроотрицательному атому, в данном случае к атому кислорода. В результате протон «оголяется», что способствует сближению атомов кислорода почти до расстояния, которое установилось бы между ними в отсутствие атома водорода.

Будем воспринимать воду как ассоциацию молекул, объединенных водородными связями. И если в жидкой воде содержатся отдельные ассоциаты ее молекул, то аналогичное расположение молекул характерно и для льда, но упорядоченность распространяется уже на всю систему в целом, что, в конечном счете, приводит к образованию характерной тетраэдрической структуры льда. Другими словами, кристаллы льда целиком построены только на одних водородных связях. Структура льда образно названа «весьма ажурной» (Л. Полинг, П. Полинг, 1978), ибо в ней молекулы упакованы менее плотно, чем в жидкой воде. При плавлении льда тетраэдрическая структура частично разрушается и молекулы воды сближаются друг с другом. Именно поэтому вода, замерзая, увеличивает свой объем на 9 % и лед при температуре 0 °С имеет меньшую плотность, чем вода. Все это приводит к тому, что водоемы

замерзают, начиная с их поверхности. Максимум плотности воды наступает при 3,98 °С. При дальнейшем охлаждении вода у поверхности становится менее плотной и поэтому остается над несколько более теплой водой глубинных слоев до тех пор, пока не замерзнет. Слой льда на поверхности предохраняет находящуюся под ним воду от дальнейших потерь тепла. В замерзших реках и озерах под льдом продолжается жизнь.

В талой воде многие водородные связи сохраняются, и агрегаты молекул с тетраэдрической структурой продолжают в ней присутствовать. По мере нагревания воды часть таких агрегатов распадается, вызывая дальнейшее повышение плотности жидкости вплоть до сакраментальной температуры 3,98 °С, после чего начинается снижение плотности с повышением температуры.

Водяной пар находится уже в состоянии отсутствия всех водородных связей. Если бы это было не так, то при тех температурах и давлении, при которых протекает жизнь на Земле, вода и лед не смогли бы столь легко и интенсивно испаряться. Здесь мы вновь возвращаемся к «тройной точке» и приходим к пониманию внутренних причин столь благостного для жизни круговорота воды в природе. Но спасительные водородные связи не только создают приемлемые гидрометеорологические условия, но и играют определенную роль и в самой жизни. В частности, наше личное физиологическое существование со своими биохимическими процессами насквозь пронизано явлениями разрыва или образования столь оптимальных для нас водородных связей.

Список удивительных свойств воды может быть продолжен. Например, температуры замерзания и кипения воды значительно выше, чем у всех родственных ей соединений (гидридов). Не будь этого, жизнь как таковая вряд ли была бы возможна. Действительно, температура плавления льда на 100°, а температура кипения воды на 180 °С превышает таковые, которые можно было бы ожидать, веди вода себя подобно другим гидридам некоторых неметаллов, соседей кислорода по периодической системе, — азотом и фтором по периоду и серой, селеном и теллуром по группе (для примера, температура плавления аммиака NH_3 — 77,7 °С, фтористого водорода HF — 92,3 °С, сероводорода H_2S — 82,9 °С, селеноводорода H_2Se — 64,0 °С).

Еще одно замечательное свойство воды — способность растворять многие вещества. Особо хорошо растворимы в воде те химические соединения, которые могут образовать с ней водородные связи. Мы в своей повседневной деятельности привыкли считать хорошими растворителями такие вещества, как спирт, бензин, эфир и многие другие, которые действительно хорошо растворяют жиры и многие органические вещества, но в них не растворяются, например, соли. Зато последние хорошо растворяются в воде, так как она обладает крайне высокой диэлектрической проница-

емостью, и ее молекулы имеют тенденцию соединяться с ионами, превращая их в ионы гидратированные, что приводит к их стабилизации в растворе. Хорошая растворимость различных солей в воде очень важна для многих природных процессов.

Заканчивая этот краткий, но думается, что полезный для гидрологов экскурс в область химии, давайте по-новому и с известной долей благоговения взглянем на воду, это удивительное химическое соединение, без которого мы не смогли бы жить, но которое мы не ценим, загрязняем всеми доступными нам способами и ругаем ее, когда страдаем от ее избытка.

А теперь давайте подумаем — суеверие или истина кроются в совершенно особых свойствах «святой воды»?

1.3. Наука «Гидрология»

Понятие о гидрологии как науке о воде вряд ли можно считать устоявшимся и общепринятым. В различных вариантах определений этой науки обычно упоминается, что гидрология рассматривает свойства, образование, состояние, распространение, распределение циркуляции природных вод, а также процессы и явления, в ней протекающие. Иногда используются выражения — наука о деятельности, наука о поведении, наука о жизни воды.

Если не возвращаться к устаревшему пониманию гидрологии, когда она включала океанологию и гидрогеологию (геогидрологию), то, отождествляя ее с гидрологией суши (континентальной гидрологией), целесообразно остановиться на приводимом ниже определении.

Гидрология — это наука:

- изучающая природные процессы и явления на земной суше, происходящие с водой, в воде или с участием воды, исключая (или не исключая?) сферы гидрохимии и гидробиологии;
- входящая в цикл наук о Земле;
- состоящая из двух частей — фундаментальной и прикладной.

Мы отказались от мысли привести что-то вроде краткой антологии определений науки «Гидрология» вследствие их нечеткости и противоречивости. Тем не менее, помимо сформулированного нами и приведенного выше, помещаем три характерные дефиниции.

1. Определение М.А.Великанова [3]: «Гидрология — наука о деятельности воды на поверхности Земли».

2. Определение немецкого гидролога Р.Келлера (Воды и водный баланс суши. М., 1965): «Гидрология — это наука о воде, находящейся над, на и под земной поверхностью в естественной совокупности всех форм ее проявления».

3. Определение из энциклопедии «Океан — Атмосфера» (Л., 1983): «Гидрология — наука, изучающая воды суши от момента их выпадения в виде осадков до возвращения в океаны».

Во многих известных учебниках по общей гидрологии и гидрологии суши определения науки, ими описываемой, вообще отсутствуют. Более того, существуют очень различные мнения о содержании, приоритетах и толковании различных аспектов гидрологии. В списке основной литературы сознательно приведен набор изданий, хорошо подтверждающих сказанное [3, 7, 9, 10, 11, 15, 16, 18, 19, 20, 27, 28].

Учение о стоке — главная содержательная часть гидрологии. Речной сток в широком смысле — природное явление перемещения свободной воды в пределах суши под действием гравитационных сил, которая рано или поздно непременно появляется в руслах рек и лишь в незначительных количествах непосредственно стекает в море. Формирование стока — главный процесс наземной части гидрологического цикла, состоящий из множества частных процессов, происходящих в естественных природных образованиях, называемых речными бассейнами.

В настоящее время гидрология находится в неудовлетворительном состоянии. До сих пор не решены многие существенные вопросы формирования стока. Вместе с математическим моделированием в гидрологии появились новые проблемы и тупики.

Медленно и с трудом пробивающаяся гидрология нового поколения связана с математическим моделированием процессов стока и появлением современных вычислительных возможностей. Но здесь важен не сам факт использования компьютеров или термина «модель». И то, и другое входит в арсенал и традиционной гидрологии. Ведь в качестве результатов вычислений теперь можно получать громадные массивы цифр и любые графические построения без изменения существенной части своих методов и подходов. Дело в приходе новых умонастроений, мировоззрений, новых сложных моделей, сама возможность появления которых явилась естественным следствием прихода эпохи компьютеров. Моделирование в тисках старой классической гидрологии в чем-то даже нелепо, хотя ее сторонники этого не замечают и оказывают ожесточенное сопротивление инакомыслию.

1.4. Разделы гидрологии

Специфично отношение между гидрологией и гидрогеологией (геогидрологией). С точки зрения аспектов теории, моделирования, расчетов, прогнозов сложившееся отделение гидрогеологии от гидрологии — недоразумение. По своей сути — это единая на-

ука. Но инженерная гидрология и инженерная гидрогеология по кругу решаемых задач сильно отличаются друг от друга. Поэтому изменить сложившуюся ситуацию очень сложно, а теперь уже возможно и нецелесообразно. Традиционно гидрогеология ближе примыкает к геологии, иногда организационно даже совмещена с ней. Граница между гидрологией и гидрогеологией иллюзорна. Почвенный покров и первые метры толщи горных пород — это область повышенного интереса гидрологии и гидрогеологии одновременно. Хотя есть и некоторая разница:

- гидрологию ярусы подземных вод в первую очередь интересуют как емкости накопления воды и в разной степени замедленного ее истечения в русловую сеть речного бассейна;
- гидрогеология исследует распространение, формы залегания, запасы, режим и движение подземных вод.

Вообще же оба названных аспекта не чужды обеим наукам. И наконец, гидрогеология и гидрология сталкиваются с проблемой взаимодействия поверхностных и подземных вод, причем каждая дисциплина считает ее своей. Следует добавить, что гидрологию интересует и глубокий подземный сток. Она в какой-то мере начинает терять интерес к подземным водам, залегающим ниже уровня моря.

Еще одна нелепость дальнейшей дезинтеграции и разграничения наук о Земле — это искусственно постепенно расширяющееся отчуждение гляциологии от гидрологии, пагубно сказывающееся на развитии обеих наук. Выразим уверенность в том, что гидрология и гляциология по большому счету — единая наука.

Довольно общепринятым или, по крайней мере, употребительным является подразделение гидрологии по водным объектам — гидрология рек, озер, болот, почв, подземных вод, ледников. Вроде бы естественно и логично. Но не все так просто. Давайте рассмотрим эти разделы последовательно.

Гидрология рек. Это почти тавтология гидрологии суши или общей гидрологии. Мы удивляемся, почему никому не пришло в голову выделить гораздо более естественную «гидрологию речных бассейнов». И если преподавателю выпала доля читать лекции по гидрологии рек, то он находится в сложном положении, ибо она практически неразделима с общей гидрологией.

Гидрология озер. Здесь ситуация сложнее, так как параллельно существующие термины «озероведение» и «лимнология» не являются ее синонимами, поскольку включают в себя множество специфических для лимнологии вопросов. Откройте, например книгу «Лимнология» Д. Хатчинсона, и вы тут же убедитесь в этом. В чем-то подобна ситуация и с гидрологией болот, противопоставленной с «болотоведением». В последнем существуют аспекты, достаточно далекие от гидрологии, но конечно с ней связанные. Если мы уже давно отделили от гидрологии «гидробиологию»

и, в какой-то мере, «гидрохимию», то для «лимнологии» и «болотоведения» это отделение уже недопустимо.

Почвенная гидрология. Близкими определениями являются «учение о почвенной влаге» и в какой-то мере «физика почвы», так как в рамках почвенной гидрологии решаются и задачи теплообмена.

Названные разделы гидрологии следует постоянно иметь в виду, но не придавать им какого-нибудь самостоятельного значения.

Иногда некоторым важным аспектам гидрологии как единой науки соответствуют такие выделяемые крупные разделы, как:

1. *Гидрометрия*;
2. *Гидрография*;
3. *Физическая гидрология*;
4. *Стохастическая гидрология*;
5. *Прикладная гидрология.*

Узаконивание различных «гидрологий» в конечном счете приносит больше вреда, чем пользы, и в первую очередь из-за расслоения мыслей самих авторов «узких гидрологий». А вот любое полное, всестороннее и глубокое исследование должно включать в себя обсуждение следующих десяти главных аспектов, важных не только в рамках гидрологии, но и во всех науках о Земле.

1. *Методологический* (взаимосвязь, избирательность, доказательность методов, приемов и подходов).
2. *Измерительный* (приборы и способы измерения изучаемых величин).
3. *Экспериментальный* (проведение экспериментов и наблюдений).
4. *Содержательный*:

• физический (описание гидрологических процессов и явлений и их зависимости от универсальных законов природы);

• химический (описание гидрологических, гидрохимических процессов и загрязнения с учетом круговорота химических элементов и веществ);

• биологический (описание гидрологических, биохимических и биологических процессов в экосистемах и биомах).

5. *Математический*:

• детерминированный (способы описания гидрологических процессов и явлений);

• вероятностный (способы описания случайных гидрологических величин, процессов и полей).

6. *Географический* (обобщение и систематизация параметров моделей формирования стока и других гидрологических процессов и явлений по ландшафтам, природным зонам и конкретным территориям).
7. *Исторический* (реставрация гидрологического прошлого и прогнозы будущего, история гидрологии).

8. *Экологический* (специфическая ориентация возможностей гидрологии в решении задач охраны окружающей среды).

9. *Прикладной*:

- расчетный (ориентация методов гидрологии для нужд строительного и экологического проектирования);
- прогностический (использование гидрологических моделей для экстраполяции гидрологических процессов в будущее);
- социологический (восприятие и реализация гидрологических идей, подготовка кадров, научно-популярная литература).

10. *Лексико-стилистический* (научная терминология, толковые и языковые гидрологические словари, переводы гидрологической литературы, словарный запас языка и стиль изложения текстов статей и монографий в области гидрологии).

1.5. Гидрология в системе наук

Говоря о месте гидрологии среди других наук и ее взаимоотношении с ними, важно не только назвать эти науки, но и обратить внимание на особенности этого взаимоотношения. Но сначала рассмотрим систему наук, в основном естественных, так или иначе оказывающих влияние не только на гидрологию, но и на другие науки о Земле.

Эта система складывается из:

- фундаментальных наук — физики, химии, биологии, математики (является ли последняя естественной наукой — вопрос спорный: «...естественные науки, включая математику» (Г. Вейль. Математическое мышление. М., 1989), «...математика...не относится к естественным наукам» (Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Т. 1. М., 1965);
- наук о Земле, имеющих отношение к трем основным «геосферам», — геологии (литосфера, включающая земные мантию и ядро), метеорологии (атмосфера), океанологии (сосредоточенная гидросфера), гидрологии (рассредоточенная гидросфера);
- истории (в данном случае природы) и географии, поскольку все сущее пребывает во времени и пространстве.

Каждая из перечисленных наук обладает способностью переполняться и размножаться. И гидрология, подобно всем наукам о Земле, имеет грани, повернутые ко всем перечисленным отраслям знания, а также располагает своими, условно самостоятельными дисциплинами.

Фундаментальные науки присутствуют в гидрологии повсеместно, и упор на их влияние и использование зависит от природы проблем и избранной методологии. Специально следует отметить великую роль «царицы наук» — физики в науках о Земле. Помимо

того, что существует физическая геология, физическая гидрология, физическая география, выделяется целый комплекс так называемых геофизических наук: в метеорологии — это физика атмосферы, в океанологии — физика моря, в геологии — геофизика, в гидрологии — геофизика вод, переименованная в «гидрофизику» [1]. В чем-то подобно и «вторжение» химии и биологии в науки о Земле. Химия породила геохимию и гидрохимию (и обе они важны для гидрологии), а биология провела акцию «экологизации».

Науки о Земле, переплетаясь, или включают в круг своих интересов одни и те же природные процессы и явления (но всегда в чем-то ограниченные своей собственной спецификой), или же «создают» промежуточные отрасли науки.

Большинство границ между основными науками о Земле и их относительно самостоятельными отраслями условны, иллюзорны или даже придуманы.

Подводя итоги сказанному, констатируем, что гидрология имеет свои физические, химические, биологические, экологические, геологические, математические, географические, исторические аспекты. В заключение хотим обратить внимание гидрологов и всех тех, кто хочет стать ими, на тот непреложный факт, что хорошая осведомленность о полезных для развития гидрологии элементах всех перечисленных выше наук — это всего лишь необходимый базовый минимум.

1.6. Основные концепции гидрологии

Концепция как система взглядов на процессы и явления и на причины их обусловливающие является необходимым элементом каждой науки. Поэтому ознакомление с набором концепций учения о стоке, и гидрологии вообще, дает возможность гидрологам получить упорядоченную информацию для размышлений о цельности, сущности и особенностях своей науки, а «негидрологам» осознать, что кроется за понятием «гидрология». Итак, концепции:

1. ***О гидрологическом цикле.*** На понятии круговорота воды в природе, связывающего воедино всю систему наук о Земле, базируются основные представления гидрологии.

2. ***О наземной части гидрологического цикла.*** Постулируется единство последовательных процессов поведения и перемещения воды между моментами выпадения осадков на поверхность суши и попадания ее в Мировой океан.

3. ***О стоке воды.*** В основе физической сущности явления стока лежит определяющее свойство воды — ее текучесть. В гравитаци-

онном поле Земли это свойство заставляет воду непрерывно двигаться. Но время и пути этого движения могут быть самыми различными.

4. ***О физических и химических особенностях воды.*** Аномальные свойства воды имеют множество уникальных гидрологических последствий: относительно глубокие реки и озера не перемерзают, вода хорошо растворяет многие химические вещества, уменьшаются амплитуды изменения температур воды и влажной почвы по сравнению с атмосферными, снижается скорость таких процессов, как промерзание, снеготаяние, испарение. Все это не только способствует многим биологическим процессам, но часто их и определяет.

5. ***О законах природы.*** Все процессы неживой природы, в том числе и гидрологические, подчиняются исключительно законам физики и химии. Претенциозны попытки ряда представителей наук о Земле сформулировать географические, геологические, гидрологические «законы». Эти несуществующие законы — только некие словесные констатации или утверждения.

6. ***О законах сохранения.*** Эти важнейшие универсальные физические законы отображены в гидрологии уравнениями водного и теплового баланса.

7. ***Об уклоне.*** Угол наклона местности, склонов, русел всегда непосредственно влияет на скорость любых движений и на величины, пропорциональные площади соприкосновения земной поверхности с атмосферой.

8. ***О речном бассейне.*** Это естественное дискретное природное образование как гидрологическая форма организации рельефа суши является местом развертывания процессов формирования стока.

9. ***О стоковом элементе.*** Это дискретное поверхностное или подземное образование есть природная форма самоорганизации оптимальных условий накопления и стекания воды на склонах речных бассейнов.

10. ***О стокоформирующем комплексе (СФК).*** Это специфическое наименование относительно однородной части территории речного бассейна с позиций учения о стоке. СФК в некотором смысле соответствует терминам «ландшафт», «экосистема» и «биогеоценоз».

11. ***О роли воды в жизни экосистем.*** Вода с экологической точки зрения — один из основных лимитирующих факторов существования и функционирования любой экосистемы. Это и есть основной существенный аспект необходимости экологической ориентации учения о стоке.

12. ***О формах скопления воды на суше.*** Явление стока сопровождается более или менее длительным задержанием воды в разного рода подходящих для этого элементах структуры верхних слоев

литосферы. Другая форма задержания воды на суше — это ее накопление в твердом состоянии. Среди форм скопления воды на суше — озера, болота, ледники, снежный покров, почвенные и подземные воды.

13. ***О взаимодействии подземных и поверхностных вод.*** Принципиально важно — стекает вода поверхностным или подземным путем. Иногда это только условность, но обычно за этим скрываются громадные динамические различия. Поэтому исключительно важны переходные процессы и явления.

14. ***О загрязнении.*** Процессы бассейнового загрязнения и формирования стока неразрывно связаны с начала и до конца.

15. ***Об опасных гидрологических явлениях.*** Если интенсивность процесса формирования стока или накопления воды превысит определенные пределы, то это прямо или косвенно приводит к опасным ситуациям и даже к катастрофам.

16. ***О роли воды в экзогенных геологических процессах.*** Почти все экзогенные процессы (выветривание, криогенные и карстовые явления, суффозия, солифлюкция, обвалы, оползни, селевые потоки, снежные лавины) связаны с косвенным, а чаще всего с прямым участием воды. Поскольку формальное разделение этих процессов на геологические и гидрологические практически невозможно, то последние естественнее всего считать областью приложения сил со стороны этих двух родственных наук — геологии и гидрологии.

17. ***Об экспериментальной гидрологии.*** Подлинные достижения в гидрологии и учении о стоке возможны только при слиянии средств экспериментального, вычислительного и теоретического их разделов.

18. ***О роли математики.*** Математическое описание дает самое четкое и ясное объяснение гидрологической реальности.

19. ***О математическом моделировании.*** Применение математики в науках о Земле основано на понятии математической модели. Адекватное природе полноценное математическое моделирование — это научный прорыв к новым возможностям гидрологии.

20. ***О детерминизме и стохастике.*** Последние должны совместно присутствовать в гидрологических теоретических построениях ровно настолько, насколько это необходимо. Наиболее удачным и полным их сочетанием, несомненно, является детерминированно-стохастическое моделирование. Однако всегда следует иметь в виду, что содержательная часть гидрологии, т.е. то, что отличает ее от других наук, целиком детерминирована. С другой стороны, статистические методы одинаково приложимы в любых науках.

21. ***О вероятности.*** Это основополагающее понятие теории вероятностей и математической статистики остается ценным и для гидрологии. Помимо прямых чисто стохастических методов, оно

может оказаться необходимым и для сугубо детерминированных моделей.

22. ***О взаимодействии с другими науками о Земле.*** Гидрология и учение о стоке должны широко пользоваться концепциями, результатами и опытом всех наук о Земле. За их счет они должны расширять свои методические возможности и, в свою очередь, обогащать их гидрологическими знаниями и подходами. При этом представляется важным слежение за единством уровня всех наук и сходством их господствующих парадигм.

23. ***О взаимоотношении с географией.*** Географы пока не заметили новых открывающихся горизонтов своей науки — географии параметров математических моделей учения о стоке и других наук о Земле. Многие из этих параметров имеют вполне определенный физический смысл и являются общими для гидрологии, геологии, почвоведения. В принципе географические обобщения и систематизацию своих параметров могут сделать и сами гидрологи (но тем хуже для географов).

24. ***О прикладной гидрологии.*** Прикладная гидрология, базируясь на понятиях, моделях и методах фундаментальной гидрологии, должна разрабатывать всякого рода пособия, рекомендации и руководства для практического использования в управлении водными ресурсами и при решении сельскохозяйственных, строительных, транспортных и других проблем, связанных с гидрологическими расчетами и прогнозами.

25. ***О расчетах стока.*** Характеристики стока — носители обобщенной информации о гидрографах стока. Главная задача расчетов стока — построить эмпирические кривые распределения характеристик стока и аппроксимировать их аналитическими кривыми, а также наилучшим способом оценить параметры последних. Вторая по значимости задача — математически описать хронологические последовательности характеристик стока. Плохо в гидрологии развиты косвенные методы оценки характеристик стока заданной вероятности. Перспективы проблемы связаны с детерминированно-стохастическим моделированием.

26. ***О прогнозах стока.*** В практике гидрологии обычно прогнозируются характеристики стока, гораздо реже сами гидрографы. Прогнозы могут быть однозначными (когда результатом прогноза является наиболее вероятная величина) или вероятностными (прогностический выход — условная кривая распределения этой величины). Кроме этого они различаются как краткосрочные, долгосрочные и сверхдолгосрочные. Основа прогноза — знание состояния речных бассейнов на дату прогнозирования. Важное значение при этом имеют варианты учета погоды за период заблаговременности прогноза.

27. ***О совмещении проблем расчетов и сверхдолгосрочных прогнозов.*** В условиях нестационарности ландшафтов и климата неизбеж-

но изменение традиционного содержания расчетов и прогнозов стока.

Решение проблемы представляется в последовательном осуществлении следующих действий:

- стохастическом моделировании погоды в условиях антропогенных изменений климата;
- детерминированном моделировании стока в условиях антропогенных преобразований ландшафтов;
- детерминированно-стохастическом моделировании и получении условных кривых распределения характеристик стока;
- анализе и трактовке результатов моделирования при оценках будущего состояния речных бассейнов.

Кроме основных концепций учения о стоке могут быть сформулированы многочисленные частные концепции, например:

- о первичности адекватности моделируемых процессов природным;
- об алгоритмическом подражании природе;
- о предельности простоты математических аппроксимаций при описании процессов формирования стока и т. п.

1.7. Возможности гидрологии

Роль гидрологии в жизни человека, часто недооцениваемая, исключительна, что обусловлено не особыми достоинствами гидрологов, а вполне объективными обстоятельствами — уникальными свойствами воды как химического вещества, являющегося главным компонентом всего живого и той среды, в которой мы способны обитать. «Природа жизненных процессов такова, что жизнь, вероятно, была бы невозможна, не будь у воды этих необычных свойств» (Л. Полинг, П. Полинг. Химия. М., 1978).

Возможности гидрологии еще до конца не осознаны и не продуманы. Они поистине неисчерпаемы. Традиционно в рамках гидрологии изучались речной сток на планете (в основном как ключ к водным ресурсам) и в какой-то мере опасные гидрологические явления, но не все и не в полной мере. Но гидрология неизбежно должна расширять область своих интересов и своей ответственности, в том числе и там, где она пока себя еще не проявила, потому что и не пыталась это осуществить.

Везде, где вода присутствует, она динамична и дает возможность проявлению дополнительной динамичности различным процессам и явлениям. Одновременно приходит и необходимость в методах гидрологии. И тогда гидрологи обязаны вмешаться в моделирование, разного рода расчеты, оценки и прогнозирование этих процессов и явлений.

Например, гидрологические модели должны быть непременным, а чаще всего основным элементом моделей большинства экзогенных геологических процессов, динамики экосистем, функционирования сельскохозяйственных систем, в том числе и на орошаемых землях, загрязнения территорий. И все это в плане и диагностическом, и вероятностных расчетов, и прогнозирования, и обоснования проектов, и рекомендаций по предотвращению катастроф и последствий непродуманных и ошибочных действий и мероприятий.

У гидрологии много общих проблем с метеорологией — проблема осадков, стохастическое моделирование погоды для обеспечения входа детерминированных гидрологических моделей, рассмотрение динамики увлажнения подстилающей поверхности в моделях климата, оценка гидрологических последствий изменения последнего и многое другое.

Поистине велика роль гидрологии в жизни человека! Но человека разумного, ибо отнюдь не всегда мы оправдываем наименование своего биологического вида.

1.8. О мировоззрении гидролога

Мировоззрение как система взглядов на природу и человечество определяет деятельность и поведение как отдельных личностей, так и различных групп людей, в том числе и в «ученом мире».

Мировоззрение тех, кто посвятил себя науке, неизбежно включает не только организованные научные знания, но и духовное, нравственное, этическое и эстетическое отношение к этим знаниям и к окружающему миру. И горе тому, чье мировоззрение сформировалось как побочный продукт жизненной суеты. В основном наше мировоззрение складывается из:

- понимания предназначения человека на Земле;
- восприятия природы и отношения к ней;
- осознания своей науки и своего места в ней;
- представления о происхождении Вселенной, Земли, Жизни и Человека.

Наше мировоззрение, мироощущение, миропонимание неизбежно накладывает отпечаток на наши научные построения, ибо благоприобретенные знания организуются гидрологом не на пустом месте, а именно в его собственных мировоззренческих рамках. Здесь мы не собираемся подробно обсуждать нравственные и философские вопросы различных вариантов мировоззрения, их связи с историческими аспектами, национальными особенностями, атеизмом и религией, да и не под силу нам это. Просто выскажем

некоторые соображения по ряду вопросов, имеющих отношение к затронутой проблеме.

Разных людей, в том числе и тех, кого мы называем учеными, разделяет их мировоззрение. Для краткости изложения обозначим только крайности.

С одной стороны, это духовное, нравственное и интеллектуальное совершенствование, самоотверженный труд, вера в конечный результат. Это благоговейное восприятие природы, стремление смотреть на природу и умение видеть ее. Это желание сопоставлять с ней нашу поэзию, музыку, живопись, готовность смиренно и терпеливо расшифровывать ее секреты.

С другой — это взгляд на природу чисто потребительский. Если человек враждебен природе, то он, будучи обывателем, ее просто захламляет, олигархом — использует для ее уничтожения под флагом экономической целесообразности всю мощь политиканства и финансов, ученым — не старается найти с ней общий язык, а пытается преподнести обществу суррогаты этого, теша свою гордыню и тщеславие, деятелем искусства — не видит ее воочию и не чувствует ее состояния, а старается заменить ее изысками самовыражения.

Если говорить о призвании Человека, то он должен быть хранителем Природы, особенно всего живого на Земле. Действительно, мы все ответственны за Природу, но и почти все принимаем участие в ее разрушении. Как дом без души является лишь местом пребывания семьи, так и наш большой Дом, наша Земля, перестает быть таковым, если Человечество окончательно лишит себя некоего духовного начала и вместо понимания и охраны Природы предпочтет сиюминутную материальную выгоду. Стремительно разрастающийся цикл «экологических наук», лишенных своего функционального духовного начала, уже становится абсолютно бесполезным, ибо он направлен на лечение внешних симптомов, а не самой болезни человеческого общества в его победоносной последней схватке с природой. Вообще естествознание убивается гордыми умами, склонными все подчинять заранее принятыми положениями под «гипнозом научной терминологии» (Войно-Ясенецкий, 1994).

Здесь просто представлена кратчайшая информация к размышлению о вечных вопросах и сделан прозрачный намек на то, что было бы неплохо иногда задуматься о связи наук и о самом себе.

1.9. О критическом начале в гидрологии

Чтобы разгадать сущность современной гидрологии, отбросив все мешающее и тормозящее ее развитию, чтобы выявить самые

глубинные положения и подлинные причины ее достижений и падений, чтобы осознать колоссальные скрытые возможности, нужно, помимо естественной профессиональной продвинутости, обладать сильнейшим критическим началом, неуемной фантазией и не очень поощряемой склонностью не считаться с неписаными правилами научного истеблишмента, главное из которых — «не высовывайся»! И еще — стараться осуществить болезненное разграничение того, что есть, и того, что должно быть, гидрологии захламленной и гидрологии очистившейся и рванувшейся вперед.

Великие научные споры и дискуссии, которые столь привычны для нас по сведениям, заимствованным из истории науки и художественных произведений, и о которых сохранились и собственные воспоминания, ныне почти исчезли с наших горизонтов. Это своего рода катастрофа, ибо «критика — это жизнь науки» (афоризм французского философа XIX в. В. Кузена).

Станислав Лем как-то заметил, что «наука как целое представляет собой систему с сильной тенденцией к самокорректировке».

Но как на последнюю можно рассчитывать, если мы всеми силами ей сопротивляемся? Здесь уместно вспомнить аналогичное мнение Ч. П. Сноу (Две культуры. М., 1973): «Наука — саморегулирующаяся система» и «критицизм свойственен самому научному прогрессу». Видимо, все же такое положение вещей постепенно ослабевает.

В последнее время критика на страницах книг и журналов по гидрологии — явление очень редкое.

Традиционно считается, что одним из самых сильных средств упорядочения и продвижения науки являются постоянные целенаправленные дискуссии. В истории физики и наук о Земле мы находим многочисленные примеры этому. Но как обстоит дело с дискуссией как формой совершенствования научной мысли в наше время?

В конечном счете, искусство вести дискуссию, по крайней мере, в гидрологии и науках о Земле, вконец угасает. Этому способствуют две основные причины:

• постепенное исчезновение интереса ученого мира к существенным задачам своей науки, проявление глубокого равнодушия к истинным ценностям, угасание подлинного профессионализма, под которым следует подразумевать не только подготовленность к использованию различных методик, математического аппарата и технических средств, но и в первую очередь стремление глубже понять природные процессы и явления;

• болезнетворная переоценка ценностей, приводящая нас к пагубному непониманию той, ранее хорошо известной истины, что наш подлинный друг в науке — это наш критик, а лютым врагом

является тот, кто расхваливает нас с дальним расчетом, что получит в свой адрес подобное же воздаяние.

Не хотелось бы думать, что названные симптомы, проявляющиеся в научных кругах, отображают состояние дел в обществе в целом, будут впредь усугубляться и по своей сути необратимы.

1.10. Предостережение

Сидя за письменным столом, осмысливая абстракции и конструируя математические модели, исследователь должен видеть за уравнениями и цифрами конкретные природные процессы, явления и ситуации. Аналогично, наблюдая за прохождением паводка на берегу реки или ручья, за формированием стока на склоне во время дождя или при снеготаянии, рассматривая открывающиеся ландшафты с самолета или вертолета, он не должен забывать об этих уравнениях и цифрах. Ограниченность деятельности (только письменный стол, только компьютер и др.) неизбежно ведет к ограниченности исследования.

Перед гидрологом, который сумеет объединить в своей личности способности экспериментатора, полевика-экспедиционника, теоретика, творца математических моделей, инженера-проектировщика, открываются поистине безграничные возможности в служении своей науке. И конечно, все открывает любовь к природе и умение видеть и ощущать сущность гидрологических процессов.

ГЛАВА 2
РЕЧНОЙ СТОК

2.1. Природа явления

2.1.1. Общие положения

Сток — природное явление перемещения свободной воды в пределах суши под воздействием гравитационных сил. Сток — непременный элемент гидрологического цикла и важнейший в жизни человека.

Поскольку почти весь сформированный на суше сток рано или поздно попадает в речную сеть, его обычно называют «речным стоком».

Часто применяемое в том же смысле словосочетание «поверхностный сток», к сожалению, не однозначно. Поэтому во избежание некоторой противоречивости и незамкнутости системы определений разных типов стока ниже сделаны отдельные уточнения и дополнения.

В узком смысле поверхностный сток — это один из видов стока по условиям его формирования. В широком же смысле — это вся вода, попавшая на поверхность суши, не испарившаяся и не изъятая из обращения в результате каких-либо природных или антропогенных процессов, и под влиянием гравитационных сил рано или поздно достигшая Мирового океана или центрального водоема бессточной области. При этом пути ее перемещения вовсе не ограничиваются только поверхностью суши.

Но имеется одно, столь же важное, сколь и формальное, условие: до попадания в океан эта вода должна появиться на поверхности суши. В этом случае подземный сток должен быть разделен на подземный речной (подземное питание рек) и подземный морской, который разгружается непосредственно в море ниже его уровня.

Понятия «поверхностный сток» в широком смысле (нигде ниже мы его не употребляем и вообще использовать не рекомендуем) и «речной сток» идентичны друг другу при соблюдении некоего условия: нерусловой сток с территории, непосредственно примыкающей к берегу моря, должен быть отнесен к речному. Для этого достаточно принять несколько формальное на первый взгляд положение: для любой территории, примыкающей к берегу моря, замыкающим створом является вся береговая линия в пределах этой территории.

2.1.2. Гидрологический цикл

«Все реки текут в море, но море не переполняется: к тому месту, откуда реки текут, они возвращаются, чтобы опять течь». Возможно, что эти слова Экклезиаста — первая формулировка сущности гидрологического цикла.

Существование суши и океана и поступающий на Землю поток солнечной энергии предопределили планетарную циркуляцию воды в системе трех классических геосфер — гидросферы, атмосферы и литосферы. Это повлекло за собой взаимодействие этих трех сфер и создало условия для протекания на Земле жизни. Нет более важного, грандиозного и всеобъемлющего явления на этой планете, чем круговорот воды. Наземная часть этого круговорота находит свое отражение во всем, что происходит на поверхности и под поверхностью суши: текут реки, плещут озера, почвенная влага питает корни растений, сами растения произрастают и кормят животный мир и род людской, подземные воды ищут свои тайные пути к рекам и морям, растворяют известняки и доломиты, создавая сказочный мир карстовых пещер...

2.1.3. Процесс формирования стока

Формирование стока — главный процесс наземной части гидрологического цикла. Он складывается из большого числа частных процессов, локализованных в границах речных бассейнов.

К таким частным процессам относятся:

- выпадение осадков на поверхность водосбора и их частичный перехват растительным покровом;
- формирование снежного покрова, если выпадающие осадки — твердые;
- динамика тепловой энергии в снежном покрове, его таяние, водоотдача и разрушение;
- процессы инфильтрации и образования поверхностного стока, если интенсивность дождя или водоотдачи воды из снежного покрова и водно-физические свойства почвы позволяют это;
- поверхностное задержание части поверхностного стока в бессточных впадинах микрорельефа;
- трансформация поверхностного стока стоковыми элементами;
- динамика почвенных вод, их фазовые превращения, задержание части воды в подвешенном состоянии и расходование ее на испарение и транспирацию, формирование почвенного и подземного стока;
- почвенный и подземный сток и его трансформация стоковыми элементами различных ярусов;

• русловое добегание и русловая трансформация стока;

• сток в замыкающем створе как итог взаимодействия всех частных процессов формирования стока.

Процессы формирования стока более подробно описаны ниже.

2.1.4. Речные бассейны

Речной бассейн — часть поверхностного слоя литосферы:

• оформившаяся как единое природное целое в процессе функционирования наземной части гидрологического цикла за достаточно длительный период геологического времени и поэтому унаследованная от климатических условий прошлого;

• связанная с системой форм рельефа и ограниченная водораздельной линией;

• вмещающая толщу разрушенных и частично разрушенных горных пород и почвенно-растительный покров;

• имеющая собственную гидрографическую, в том числе речную, сеть и разработанные пути поверхностного и подземного стекания в нее;

• ограниченная устьем главной реки или любой другой точкой, расположенной выше по течению (замыкающий створ).

Главная характеристика бассейна — его площадь. Для указания размеров речных бассейнов широко используют определения — большие, средние и малые. Встречающиеся в литературе данные (например, малые бассейны имеют площадь 2 тыс. км^2 и менее) бездоказательны и непонятны. Условностей здесь избежать нельзя, но можно пользоваться какой-нибудь достаточно логичной общественной договоренностью, например: малые бассейны измеряются единицами, десятками и сотнями квадратных километров; средние бассейны — тысячами и десятками тысяч квадратных километров; большие бассейны — сотнями тысяч и миллионами квадратных километров.

Вся суша состоит из речных бассейнов самых разных размеров. Каждый более крупный бассейн складывается из более мелких и так вплоть до элементарных водосборов. Последних на Земле великое множество, порядка 10^9, и их площади в зависимости от характера рельефа и природной зоны колеблются в довольно значительных пределах (0,01 — 1 км^2). Очевидно, что на другом конце иерархической последовательности речных бассейнов по их величине фигурирует цифра $7 \cdot 10^6$ км^2 (бассейн Амазонки).

В пределах речных бассейнов встречаются самые разные гидрологические и негидрологические, но играющие важную гидрологическую роль объекты. Все они различным образом участвуют в едином процессе формирования стока.

Главный и частные водоразделы бывают поверхностными и подземными, различных ярусов.

Склоны — поверхности, ограниченные со всех сторон орографическими линиями — водоразделами и руслами. В пределах склона во время снеготаяния и выпадения дождей могут возникнуть нерусловые потоки. При формировании поверхностного стока вода стекает по микроручейковой сети (эрозионным бороздам). Иногда во время сильных ливней наблюдается и сплошное стекание, когда почти весь склон покрыт водой, хотя и неравномерно.

Растительный покров осуществляет перехват осадков и определяет вклад транспирации в суммарное испарение.

Почвенно-грунтовая толща на склонах — элемент бассейна особо большого гидрологического значения. Это среда, эффективно аккумулирующая воду и играющая основную роль в преобразовании осадков в сток. Ее важнейшие гидрологические свойства — фильтрационные и водоудерживающие. При формировании почвенного и грунтового стока движение воды осуществляется в пределах слоев, где этому способствует наличие относительно слабопроницаемых горизонтов. Такое движение называют *сквозным* (throughflow) или *подповерхностным* (subsurface) *стоком*. В процессе стекания воды происходит ее сосредоточение в подземной дренажной сети. Почва регулирует потребление воды растениями и затраты ее на испарение. В конечном счете — это элемент, в основном определяющий особенности водно-балансовых соотношений в бассейне.

Толща связных, песчаных, крупнообломочных или трещиноватых скальных горных пород, составляющих приповерхностную часть земной коры, вмещает водоносные горизонты, линзы и ярусы подземных вод различных уровней.

Стоковые элементы — ограниченные микроводоразделами участки поверхностных и подземных элементарных склонов и водосборов, обращенные своей «водосливной» частью к склоновой нерусловой или подземной дренажной сети. Поверхностные стоковые элементы в зависимости от уклона и ландшафта могут изменяться от 10^{-3} до 10^{4} м^2, подземные могут быть гораздо больше. Для каждого стокового элемента существует нелинейная зависимость между объемом и оттоком воды. Картина функционирования множества стоковых элементов совершенно не похожа на стекание сплошного слоя воды, толщина которого почти линейно нарастает от водораздела до подошвы склона, как это описывается в большинстве учебников по гидрологии. Стоковый элемент — минимальное предельное природное воплощение водосборного принципа.

Реки — постоянные водотоки различных размеров, текущие в разработанных ими руслах.

Сухие русла — пути течения временных водотоков в аридной зоне, в засушливое время четко прослеживаемые по русловым образованиям и отложениям влекомых наносов. Известны многочисленные местные наименования таких объектов: вади (Северная Африка, Аравия), сай (Узбекистан, Таджикистан, Киргизия), чай (Азербайджан, Туркмения), сайр (Монголия), чо (Индия, Пакистан), чаунг (Бирма), нала (Восточная Африка, Ближний Восток), ошана (Южная Африка), омурамба (Намибия), арройо (юго-запад США, Латинская Америка), кули (запад Канады и США), крик (юго-запад США, Австралия).

Озера можно воспринимать как элементы гидрографической сети речных бассейнов. В принципе озера играют двоякую роль: с одной стороны они активно испаряют воду, с другой — являются естественными регуляторами стока, выравнивая гидрографы истечения воды из своих емкостей. Чем больше динамический объем озера (общий объем воды за исключением «мертвого» объема), тем выше, при прочих равных условиях, его регулирующее влияние на сток реки. Реки, вытекающие из очень крупных озер, характеризуются высоким постоянством расходов. Самые известные примеры: река Святого Лаврентия, вытекающая из системы Великих озер; река Нева, имеющая в своем бассейне такие водоемы, как Ладога, Онега, Большая Сайма и Ильмень; река Ангара и озеро Байкал.

Велика роль озер как элементов «рассеивания» стока, особенно в аридных зонах. При этом важную роль играет форма озерной чаши, ибо при колебаниях уровня площадь озера может изменяться очень мало или же, наоборот, в большой мере. В засушливые месяцы и годы площади таких озер могут сокращаться очень сильно, иногда в несколько раз, что, в конце концов, приводит к сокращению испарения воды в бассейне. Но следует иметь в виду, что обнажившаяся часть дна озера в течение некоторого времени остается мощным испарителем. В будущем при заполнении озерной чаши водой эти потери воды должны быть восполнены. Примеры таких озер: Ильмень (Европа), Чад (Африка), Эйр (Австралия), Мар-Чикита (Южная Америка).

Имеются целые ландшафты, особенно в тундровой зоне, когда маленькие и неглубокие проточные озера почти сплошь усеивают большие территории. В этом случае осадки, выпадающие на водную поверхность, ведут к формированию так называемого прямого стока, обладающего, несмотря на малые уклоны, большой динамичностью.

Лужи — небольшие (доли, единицы, десятки квадратных метров) плоские углубления на поверхности земли, заполняемые талой или дождевой водой при формировании поверхностного стока. Система луж как отрицательных форм микрорельефа поверхности водосборов составляет емкость поверхностного задержания

стока. Лужи обеспечивают большой вклад в суммарное испарение и очень малый в инфильтрацию вод. О гидрологической роли луж и других стоячих скоплений воды в литературе можно найти противоречивые суждения. Некоторые считают эти объекты основными поставщиками воды в общем процессе инфильтрации. Им резонно возражают, утверждая, что очаги активной инфильтрации и очаги поверхностного задержания воды не совпадают, так как дно почти каждой лужи покрыто слоем уплотненного ила.

А вот мнение гидрогеолога: при снеготаянии в понижениях рельефа образуются «крупные лужи и местные болота, являющиеся очагами повышенного питания» («потускулярная» теория формирования грунтовых вод) (В. М. Шестаков. Геогидрология — научное направление и образовательная дисциплина. М., 1999). Постоянно возобновляемые лужи, так же как и верховые болота, настолько слабо теряют воду на фильтрацию, что это всегда вызывало удивление.

Болота — специфические водно-растительные образования:

- с характерными влаголюбивыми биоценозами, где накопления мертвых неразложившихся растительных остатков постепенно превращаются в торф;
- имеющие крайние варианты своего выражения в зависимости от своего местоположения в бассейне в виде плоских и вогнутых низинных (евтрофных) и выпуклых верховых (олиготрофных) вариантов своего существования;
- обладающие особой морфологией (гряды, бугры, кочки) и гидрографией (внутриболотные ручьи, речки и озера, топи, трясины, мочажины);
- состоящие из двух основных ярусов: инертного слоя, лежащего на минеральном днище, и верхнего деятельного слоя.

В основе поведения болота как гидрологического объекта находятся свойства деятельного и инертного слоев. Толщина инертного слоя колеблется от нуля до первых десятков метров. Для него характерна малая водопроницаемость, постоянство количества воды, объемная доля которой составляет от 90 до 97 %, отсутствие воздуха и аэробных микроорганизмов. Толщина деятельного слоя 0,4—1,0 м. Фильтрационные свойства его уменьшаются с глубиной в 10^3—10^4 раз.

Испарение и транспирация с поверхности болот относительно очень велики. Особо значительны они в аридной зоне и в заболоченных тропических лесах.

Водный режим болот и их участие в формировании стока в каждый данный момент времени определяет положение уровня болотных вод.

Причем крайние нижнее и верхнее положения этого уровня переводят одно и то же болото то в стадию аккумуляции воды, то интенсивной водоотдачи.

Ледники и наледи. Если на какой-либо территории, расположенной на больших абсолютных высотах, количество твердых осадков систематически преобладает над возможностями их стаивания, происходит накопление снега, превращающегося последовательно в фирн и лед. Последний, обладающий вязко-пластическими свойствами, способен к медленному течению, что и происходит различным образом в зависимости от особенностей рельефа. Ледниковые языки, передвигаясь ниже снеговой линии, разгружают область хионосферы и создают условия для формирования стока талых вод. В результате ледниковое половодье дополняет, а в конце лета, после схода сезонного снежного покрова, полностью сменяет обычное. В этом и состоит гидрологическая роль ледников, вносящих определенные своеобразные черты в процесс формирования стока в высокогорных районах. Эта описанная, несколько идеализированная картина иногда нарушается проявлениями неравновесности динамики ледников: их пульсациями и прорывами внутриледниковых, подпруженных и моренных водоемов.

Вообще же существуют два принципиально различных вида стока, формирующегося в пределах бассейнов и определяемого фазовым состоянием воды. В замыкающем створе — это или жидкая вода, или лед, или то и другое вместе. Если лед стаивает выше замыкающего створа, то можно говорить о ледниковом питании реки. Если же он перетекает эту границу, то о «стоке» в обычном понимании этого слова речь не идет. Некоторые привычные понятия замещаются иными: водосборный бассейн — ледосборный бассейн, водораздел — ледораздел, сток воды — сток льда. Самое резкое различие между двумя названными видами стока состоит в скорости течения: для воды — это метры в секунду, для льда — метры в год.

В районах с суровыми зимами, особенно в зоне многолетней мерзлоты, распространен другой вариант накопления запасов «твердой воды» в речных бассейнах — наледи. Основной процесс их восполнения — замерзание выклинивающихся грунтовых вод. В результате наблюдается перемерзание малых рек зимой и дополнительное поступление талых вод в летнее время.

Концепция речного бассейна как наиболее приемлемой и четко очерченной самой природой единицей взята на вооружение не только гидрологией, но и экологией (водосборный бассейн как экосистема), ландшафтоведением (речной водосбор как ландшафтная единица), географией (из всех единиц районирования речной бассейн наиболее удобен), почвоведением и геоморфологией (водосборный бассейн как педогеоморфологическая единица). Действительно, любые границы между выделяемыми на местности сущностями — ландшафтами, биомами и биоценозами, стокоформирующими комплексами, почвенными ареалами — ус-

ловны и однозначно невоспроизводимы на одной и той же территории даже лицами, объединенными одной и той же специальностью. В то же время система водоразделов делит земную поверхность на множество водосборов любых размеров в любой географической зоне, что запечатлено на топографических картах и в любой момент может быть однозначно использовано.

2.1.5. Виды питания рек

В традиционной гидрологии принято выделять следующие основные варианты питания рек: дождевое, снеговое, ледниковое и подземное. Такое разделение очень условно и не может быть четким, ибо осуществлено по неоднородным признакам: первые два источника питания различаются по фазовому состоянию осадков со всеми вытекающими отсюда последствиями, а последние — по форме и месту накопления запасов воды. Все четыре источника питания не одинаковы по скорости влагооборота, причем подземное питание из различных ярусов водонасыщенных горизонтов в отношении времени реакции может различаться в сотни и тысячи раз.

В течение многих лет упорно разрабатывались способы расчленения гидрографов на эти четыре составляющие общего стока по источникам питания. Такая процедура представлялась важной, так как влияние различных вариантов питания рек сказывается на облике их гидрографов стока.

По большому счету задача расчленения гидрографов по типам питания не является корректной по многим причинам:

- делается попытка определить по сумме слагаемые, пусть даже с помощью самых изощренных манипуляций;
- дождевой и снеговой стоки редко следуют друг за другом последовательно, чаще всего — это смешанное питание с неизвестными соотношениями;
- общий талый сток, там, где имеются ледники, чаще всего является снежно-ледниковым;
- понятие подземного стока в общем случае очень условно и неопределенно (какое расстояние вода должна пройти или сколько времени находиться под поверхностью суши, чтобы ее попадание в русловую сеть ассоциировалось с подземным питанием?)

Поэтому представленные во многих изданиях таблицы с разделением стока по четырем источникам питания — не более чем условность. Известны случаи изменения этих цифр в 2—3 раза. И это связано не столько со слабой точностью измерений и расчетов, сколько с неопределенностью самих понятий.

Современное математическое моделирование дает возможность однозначного определения типов стока: поверхностного, почвен-

ного и подземного различных ярусов. Разделение же дождевого и снегового стока принципиально невозможно, так как дождевые и талые воды часто смешиваются еще до своего попадания в почву. К тому же остается неизвестным, какая вода пошла на испарение и формирование почвенной влаги, а какая на почвенный и подземный сток. Конечно, здесь возможны формализованные решения, но они всегда останутся неполноценными.

2.1.6. Почвенные воды и испарение

Динамика влаги в почве и реголите (поверхностных рыхлых образованиях любого происхождения и самого разнообразного характера) как во время поступления талых и дождевых вод, так и в период их расходования — один из важнейших элементов наземной части гидрологического цикла. Именно почва поставляет влагу к испаряющей поверхности или способствует ее попаданию в подземные воды.

Интенсивность испарения лимитируется степенью увлажнения почвы [2]. При влажности, превышающей максимальную водоудерживающую способность (полевую или наименьшую влагоемкость), испарение равно испаряемости. Испарение с поверхности почвы и растительного покрова равно сумме потерь воды во всех слоях почвы. Чем ниже расположен почвенный слой, тем меньше его вклад в суммарное испарение.

Водоотдача из любого слоя почвы отсутствует до тех пор, пока его влагосодержание не превысит максимальную водоудерживающую способность. Как только этот уровень достигнут, вся дополнительная вода полностью покидает этот слой и поступает в нижеследующий. Если низкая инфильтрационная способность некоторых горизонтов наложит ограничения на свободное просачивание воды, то формируется почвенный сток. В частности, это происходит при протаивании промерзшей ледосцементированной почвы.

2.1.7. Подземные воды и подземный приток в реки

Подземными называют воды, находящиеся в верхних слоях литосферы, в толще разрушенных или трещиноватых горных пород. Особо могут быть выделены подземные карстовые воды, более обильные и динамичные.

Подземный сток — явление, включающее в себя три последовательные фазы: перемещение инфильтрационных вод к уровню подземных, напорное и безнапорное движение подземных вод, разгрузку или выклинивание последних в гидрографическую сеть.

Режим подземного стока широко меняется в зависимости от вида порождающих его подземных вод: верховодки, грунтовых, трещинных, карстовых, артезианских, над-, меж- и подмерзлотных. Водообильность горных пород и подвижность подземных вод, как правило, уменьшаются с глубиной, поэтому имеет место вертикальная зональность подземных водоносных структур. Интенсивность истечения вод различных ярусов резко изменяется с глубиной, одновременно увеличиваются время реакции и слой запасов воды.

Время реакции подземного водоносного горизонта (что-то вроде подземного времени добегания) — это продолжительность снижения расхода истечения от его начального значения Q_0 до какой-то его определенной доли, например до $0{,}5Q_0$ (период «полурасхода») или до Q_0/e (время релаксации), где e = 2,718 — основание натуральных логарифмов.

Ярусы подземных вод, классифицируемые по их участию в питании рек, могут быть подразделены на следующие пять групп:

- быстрого грунтового стока;
- грунтового стока;
- верхнего подземного стока;
- глубокого подземного стока;
- исторического подземного стока.

2.1.8. Законы сохранения и водный баланс

В традиционной гидрологии понятие водного баланса играет очень значительную роль. История науки свидетельствует о прямом использовании законов сохранения для некоторых практических оценок на этапе недостаточного понимания конкретных физических процессов. Так, и в гидрологии «метод водного баланса» часто использовался для самых различных оценок и расчетов, но всегда приближенных. В основе этого метода лежит учет всех элементов уравнения водного баланса. В зависимости от постановки задачи это уравнение служило или для определения неизвестного своего члена, или для контроля («увязывания») при оценке всех элементов водного баланса.

Часто уравнение водного баланса как бы определяло форму описания гидрологического состояния той или иной территории. Для расширения этой формы речной сток обычно разделялся на свои составляющие, например на поверхностную и подземную. Само различение поверхностного и подземного стока, столь четко осуществляющееся при математическом моделировании, полностью неопределенно при эмпирических оценках типа традиционного расчленения гидрографов стока.

Могло показаться, что задача изучения водного баланса являлась чуть ли не главной целью гидрологии. Это произошло вслед-

ствие того, что закон сохранения массы (в данном случае массы воды) касается одновременно всех звеньев наземной части гидрологического цикла, изучение и моделирование которых действительно являются задачей современной гидрологии. Что же касается моделей процессов формирования стока, то законы сохранения лежат (или должны лежать) в основе всей алгоритмической системы этих моделей.

Закону сохранения массы в данном контексте соответствует следующее уравнение водного баланса:

$$dH/dt = i1 + i2 - e1 - e2 - e3 - q1 - q2 + q3 - q4,$$

где t — время; H — гидрологическая переменная состояния речного бассейна — слой воды, находящейся в любом виде (вода в почве, снежном покрове, ледниках, наледях, водоемах — озерах, болотах, прудах и лужах, водотоках — ручьях и реках, подземных водах, емкостях перехвата воды растительным покровом, биологических системах, антропогенных структурах); в правой части уравнения — интенсивности: $i1$ — осадков, $i2$ — конденсации, $e1$ — испарения с поверхности воды, $e2$ — испарения с поверхности почвы, $e3$ — транспирации, $q1$ — стока воды в замыкающем створе, $q2$ — подземного оттока воды за пределы бассейна, $q3$, $q4$ — притока и оттока воды через линию водораздела (в точках транзитного протекания или бифуркации).

Поскольку фазовые переходы воды (замерзание, таяние, испарение, конденсация) во многом определяют формирование и режим стока, то закон сохранения энергии играет не менее важную роль, чем только что описанный:

$$dT/dt = s1 - s2 \pm r1 \pm r2 \pm r3 \pm r4 + r5 + r6 + r7 + r8,$$

где T — энергетическая переменная состояния речного бассейна — количество тепловой энергии, содержащейся в бассейне (в почве, снежном и ледовом покрове, горной породе, подземных водах, водоемах и водотоках, биомассе, антропогенных структурах); в правой части уравнения — интенсивности: $s1$ — суммарного прихода солнечной или иной космической радиации, $s2$ — встречной и отраженной радиации, $r1$ — теплообмена подстилающей поверхности и атмосферы, $r2$ — прихода тепловой энергии вместе с осадками, $r3$ — затрат энергии при фазовых переходах воды, $r4$ — затрат энергии при физико-химических, химических и биохимических процессах (разложение мертвых остатков биологических веществ, смачивание сухого грунта, растворение химических веществ, природные пожары), $r5$ — выделения тепла при диссипации потенциальной энергии воды при ее движении от мест формирования стока до замыкающего створа, $r6$ — выделения тепла за счет эндогенных геологических процессов (извержения

вулканов, землетрясения), $r7$ — выделения тепла при падении метеоритов, $r8$ — прямого выделения тепла антропогенными структурами.

2.1.9. Режим, гидрографы и характеристики стока

Традиционная гидрология под режимом речного стока всегда понимала описание того впечатления, которое осталось бы у наблюдателя, простаивай он на берегу реки дни и ночи год за годом. Он видел бы, как уровень воды поднимался и падал, и как менялись скорости течения. Он ощутил бы бурность половодий и дождевых паводков и безмятежность межени. Три перечисленных явления есть последовательно сменяющие друг друга фазы водного режима.

Более современные описания режима речного стока иллюстрируются графиками и цифрами. Однако никакие описания и никакие разрозненные цифры не могут заменить непрерывные (на самом деле дискретизированные с суточным или более мелким шагом) гидрографы стока, несущие всю полноту действительной информации о режиме стока за многие годы.

На прилагаемых рисунках продемонстрированы несколько гидрографов стока для нескольких рек России за отдельные годы (рис. 2.1—2.5).

Вдумчивый читатель, анализируя эти гидрографы, может заметить ряд их отличительных свойств, связанных с особенностя-

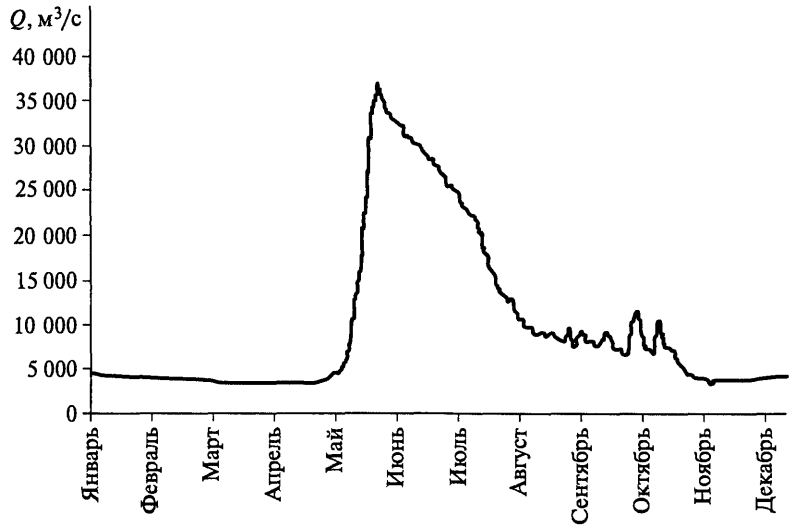


Рис. 2.1. Гидрограф стока на р. Оби у Салехарда (F=2 950 тыс. км^2), 1989 г.

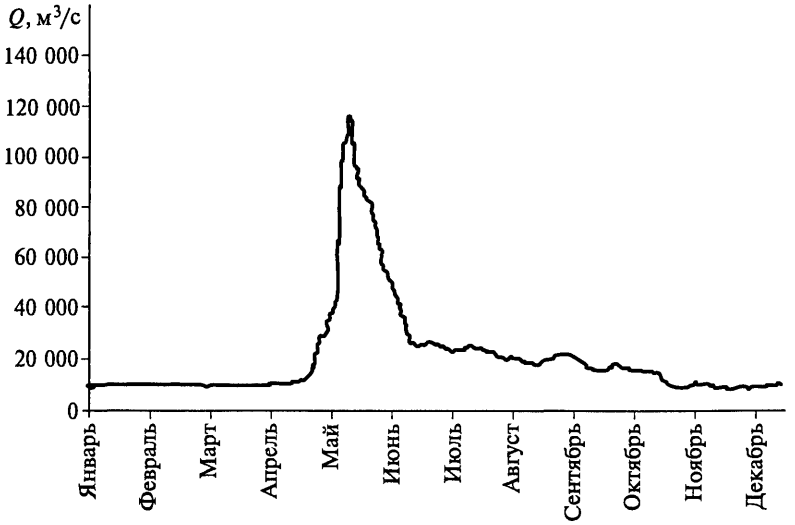


Рис. 2.2. Гидрограф стока на р. Енисей у Игарки (F=2 440 тыс. км^2), 1996 г.

ми речных бассейнов. Например, очевидное воздействие Ладожского и Онежского озер на относительную внутригодовую равномерность стока Невы. Или, при почти равновеликих бассейнах, более чем трехкратное превышение максимальных расходов на Енисее и Лене (плато и нагорья) по сравнению с Обью (в основном низменности и болота).

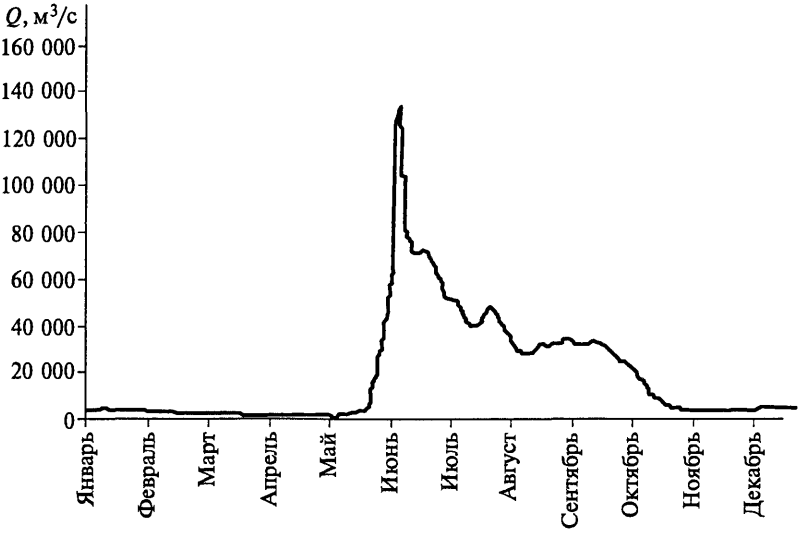


Рис. 2.3. Гидрограф стока на р. Лене у Кюсюра (F=2430 тыс.км^2), 1982 г.

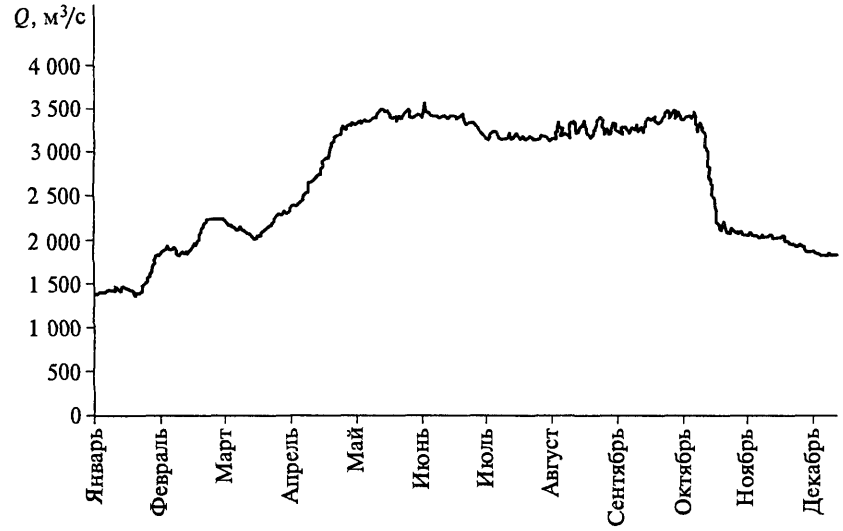


Рис. 2.4. Гидрограф стока на р. Неве у Новосаратовки ($F = 281\,000$ км^2), 1979 г.

Тем не менее человеческая склонность к упрощениям привела к попыткам отобразить гидрограф каким-то малым набором цифр — характеристиками стока.

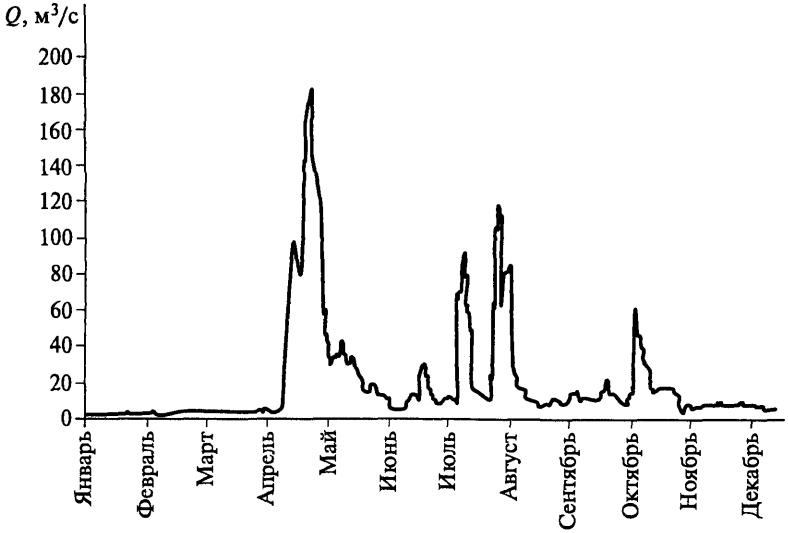


Рис. 2.5. Гидрограф стока на р. Белой у Арского Камня ($F = 2\,300$ км^2), 1999 г.

Среди последних выделяются характеристики двух типов:

• имеющие вполне строгое значение (средние суточные и годовые и годовые экстремальные расходы);

• несущие в себе неопределенность выделения и нечеткость оценок (объемы половодья, дождевых паводков, межени).

Такие характеристики, как средние месячные или декадные расходы, определяются абсолютно однозначно, но обладают тем неоднократно отмеченным недостатком, что в разные годы могут относиться к различным «фазово-однородным» периодам. Иногда в некоторых географических районах незаконченность таких периодов к 1 января приводила к пожеланиям введения понятия о так называемом «гидрологическом годе», обычно исчисляемом с какой-либо удобной «круглой» даты поздней осени.

Можно сделать вывод, что обоснованными периодами осреднения для гидрологических процессов (так же как и для всех иных природных явлений) могут быть только те, которые являются следствием астрономической неизбежности. Это сутки и годы. Поэтому вполне закономерным детерминированным явлением представляется суточный и годовой ход различных гидрометеорологических элементов и показателей.

Когда вместо таких «законных» периодов рассматриваются фазово-однородные периоды (в пределах года) или группировки лет различной водности и разного рода циклы (за многолетие), сразу возникают неопределенности. История гидрометеорологии изобилует изощренными попытками отыскать закономерности в цикличности природных явлений. Но циклы отличаются от «законных» периодов именно тем, что границы их сомнительны, продолжительности различны и сами признаки их выделения условны.

В результате увлечения интегральными характеристиками вместо построения цельного учения о стоке как едином непрерывном, но сильно изменяющемся во времени и пространстве процессе появилась некая почти независимая последовательность отдельных разделов о годовом стоке, о его внутригодовом распределении, о максимальном и минимальном стоке. Такое разобщение, на определенном этапе даже удобное и полезное, в конечном счете привело к неполноценности взглядов на формирование стока как единого явления. Последнее было подменено серией некорректных понятий — «формирование годового», «формирование максимального», «формирование минимального стока».

2.1.10. Пространственные аспекты формирования стока

Физика процессов формирования стока в любом месте суши одинакова. Другое дело, что условия их протекания чрезвычайно разнообразны. Поэтому различные частные процессы в условиях

чрезмерного поступления воды на поверхность суши или ее лимитирования проявляются по-разному, а иногда как бы отсутствуют вовсе или, наоборот, определяют ситуацию.

Концепция единства процессов формирования стока в литературе по гидрологии чаще всего не формулируется. Напротив, можно встретить упоминания о большом разнообразии процессов стока в различных географических условиях. Если перейти на более строгий язык математического моделирования, то можно утверждать, что модель должна быть единой, а все природные особенности условий формирования стока должны отображаться параметрически.

Пространственные особенности формирования стока являются прямым следствием пространственной неоднородности поверхности суши и климатических условий. Но, говоря о такой неоднородности, следует постоянно иметь в виду масштабы ее рассмотрения. Во всех науках о Земле присутствуют разного рода классификации пространственных масштабов рассмотрения различных явлений или форм существования природных объектов. Общеизвестны такие термины, как макро-, мезо- и микроклимат, макро-, мезо- и микрорельеф. Когда трех таксонов не хватает, появляются дополнительные, такие как «локальный», «зональный», «синоптический» масштабы или другие, более частные и специфичные. Принятого общенаучного количественного сопровождения этих терминов пока нет, наоборот, присутствует мешающее разнообразие.

Длины и площади, соответствующие разным масштабам рассмотрения территории и поэтому разной степени генерализации информации, целесообразно исчислять следующими десятичными разрядами цифры 1 (в качестве единиц линейных размеров ниже везде принят километр, а площадных соответственно квадратный километр). Для конкретных масштабов указаны их дольность или кратность:

дольность: α — микромасштаб — сотые — десятитысячные; β — микромасштаб — десятые — тысячные и сотые; γ — микромасштаб — единицы — десятые и единицы;

кратность: мезомасштаб — десятки — десятки и сотни; макромасштаб — сотни — тысячи и десятки тысяч; мегамасштаб — тысячи — сотни тысяч и миллионы; глобальный (планетарный) масштаб — континенты и суша в целом.

Здесь же сразу удобно и уместно указать масштабы географических карт, подходящих при работе с речными бассейнами разных размеров при различных масштабах их рассмотрения (в этом предложении слово «масштаб» использовано одновременно в двух его различных вариантах; важно не спутать, что при больших масштабах рассмотрения используются мелкомасштабные карты, и наоборот):

микромасштаб	1 : 100 — 1 : 10 000;
мезомасштаб	1 : 25 000 — 1 : 100 000;
макромасштаб	1 : 200 000 — 1 : 1 000 000;
мегамасштаб	1 : 2 000 000 — 1 : 10 000 000;
глобальный масштаб	1 : 20 000 000 — 1 : 100 000 000.

При распределенном моделировании стока должно соблюдаться приближенное соотношение между масштабами речного бассейна и его элементов, принимаемых за условно однородные, — это два соседних таксона.

Микромасштабные особенности формирования стока можно наблюдать, находясь непосредственно в пределах элементарного водосбора. Собственно, любые наземные «точечные» наблюдения и измерения производятся только так.

Систематические микромасштабные неоднородности в первую очередь связаны с положением рассматриваемого участка на склоне. На последнем устанавливается некоторое динамическое равновесие между свойствами почв и растительности, влияющими на почвенную гидрологию, и возможностями движения воды, что является решающим фактором при формировании типа почвы. В пределах склона почвы развиваются обычно на одних и тех же материнских породах, но различаются вследствие местных изменений в системе стока.

Последовательность изменений свойств почвы от водоразделов к основанию склонов получила в почвоведении специальное наименование «катена». Последняя в какой-то мере унаследована от климата не очень далекого прошлого. Основные факторы катенарной дифференциации — процессы переноса (эрозия, оползание почвы, движение почвенных масс), определяемые крутизной, длиной и формой склона. В нижней части склонов обычно наблюдается более слабый дренаж, чем в верхней. Поэтому участки территории, примыкающие к руслам, во время снеготаяния и выпадения дождей обильно насыщены водой. С ростом интенсивности поступления воды поверхность подтопленной территории может увеличиваться. На гидрографах стока элементарных водосборов прямой сток с подтопленной территории обычно отмечен четко выраженными острыми пиками. Если климатическая и даже погодная ситуации для элементарного водосбора представляются более или менее одинаковыми, то интенсивности формирования стока обладают большой пространственной изменчивостью.

Дополнительные особенности на условия формирования стока накладываются в результате различий в приходе прямой солнечной радиации на склоны, имеющие разные ориентацию и углы наклона. Микрорельеф в большой мере определяют микроклиматические особенности, на которые немедленно реагируют местная растительность и формирование стока. Часто ландшафты раз-

личны на противоположных склонах даже одного и того же элементарного водосбора. Особо разительными такие контрасты бывают в горах.

При переходе от одного масштаба к другому неизбежно осуществляется последовательная генерализация характеристик рельефа, почвы, растительности, климата, стока. Точно такой же подход должен сохраняться и при математическом моделировании природных процессов, в частности процессов формирования стока. Поэтому и реализации одних и тех же моделей могут быть и микромасштабными (учитывающими все возможные подробности, но поэтому ограниченными территориально), и мезо-, и макро-, и мегамасштабными, а также и глобальными. И если какая-либо модель с этим не справляется, то это свидетельствует о ее неполноценности или о чем-то гораздо более серьезном.

Та самая генерализация, которая играет столь определяющую роль в картографии, лежит и в основе любого территориального описания природных явлений, в том числе и формирования стока. *Генерализация* — процедура фильтрации информации с целью освобождения ее от второстепенных деталей, перестающих иметь какое-либо значение на данном уровне рассмотрения вследствие своей пространственной малости.

Появившееся в работах по картографии утверждение, что в процессе генерализации происходят не только неизбежные потери части информации, но и приобретается качественно новая информация, естественно, не соответствует действительности. Другое дело, что ликвидация несущественных деталей и упрощение очертаний оставленных объектов способствуют выявлению до сих пор информационно замаскированных закономерностей. Но это не порождение новой информации, а создание более комфортных условий для более крупномасштабного анализа. Это, образно говоря, удаление тех самых деревьев, из-за которых не видно леса.

Картография еще сохранила многие классические приемы генерализации, не чуждые некоторого субъективизма. Полностью строг и однозначен алгоритм скользящего пространственного осреднения, генерализующий цифровую карту крупного масштаба в карту более мелкого. Здесь можно только поспорить о преимуществах гексагональной сетки перед прямоугольной.

Итак, особенности формирования стока, выявленные при различных масштабах рассмотрения, относятся не к сущности протекающих природных процессов — они всегда одни и те же, а к степени подробности увиденного и осознанного.

Представления о стоке вообще и об особенностях его формирования в более крупных бассейнах и на более значительных территориях, соответствующих более высоким уровням рассмотрения, чем микромасштабный, складываются в результате проведения следующих возможных процедур:

• генерализации, типизации, осреднения и обобщения информации, полученной на наземной метеорологической сети, а также на площадках и малых водосборах микромасштабного уровня;

• обобщения данных наблюдений за стоком в замыкающих створах речных бассейнов мезо-, макро- и мегамасштабного уровней;

• проведения и систематизации площадных дистанционных наблюдений разного масштаба за снежным покровом, температурой и влажностью почвы и другими показателями состояния речных бассейнов;

• использования сведений об осадках по радарным и спутниковым измерениям разного масштаба.

Мезомасштабному «взгляду» на ту или иную территорию открываются бассейны малых рек. Еще различимы элементарные водосборы, но воспринимаются они уже как единое целое. Усматриваются местные особенности климатических различий, что особо ярко проявляется в горных условиях. Вообще в горах, даже в бассейнах площадью 100 или 1 000 км^2, множество элементарных водосборов разбросано по разным высотным и ландшафтным зонам, что приводит к различиям в сроках и продолжительности снеготаяния и фенологических влияний. Скользящее пространственное осреднение здесь уже во многом сглаживает и рельеф, и ландшафтную неоднородность, и увлажненность, но еще во многом отражает местные особенности формирования стока.

Дальнейшее увеличение пространственного масштаба рассмотрения процессов стока приобретает смысл только при соответствующем изменении и временного масштаба. При этом из поля зрения гидролога исчезают локальные особенности и детали, а сохраняется только самый общий фон протекающих гидрологических событий. Очевидно, что крупномасштабные картины формирования стока в большой мере связаны с закономерностями природной зональности.

Макромасштабный «взгляд» выделяет средние речные бассейны, а мегамасштабный соответствует большим бассейнам и позволяет установить различия в условиях формирования стока между природными зонами, равнинами и горными системами, частями континентов. Здесь представляются важными особенности расположения больших бассейнов. Если большие реки текут в меридиональном направлении, то контрасты в условиях формирования стока между различными частями бассейнов обычно гораздо более велики, чем если они текут в широтном. Так, Нил, Миссисипи, Волга, Обь, Енисей пересекают по несколько природных зон, часто с резко различными условиями формирования стока. С другой стороны громадный бассейн Амазонки, исключая верховья Мараньона и Укаяли, почти целиком находится в зоне тропического дождевого леса, а бассейн реки Святого Лаврентия — в пределах хвойного лаврентийского леса.

Другой вариант потрясающих контрастов — горы и равнины в одном бассейне. В некоторых отношениях — это просто разные гидрологические миры. Яркие примеры: объединенный бассейн Ганга и Брахмапутры, бассейны рек Меконга, Янцзыцзян, Амударьи, Сырдарьи, Тарима. Для трех последних объектов контрастность подчеркивается пустынностью равнинной части бассейнов. Интересно, что все семь названных речных бассейнов связаны с высочайшей в мире горной системой Центральной Азии. Достойный пример на другом континенте — р. Ориноко.

Помимо обычных детерминированных пространственных особенностей, описанных выше, существует наводимая атмосферной циркуляцией пространственно-временная стохастичность, а может быть детерминированная хаотичность (для их различия необходимо проведение специальных долговременных исследований) непрерывных полей стока, а следовательно, и полей их соответствующим образом дискретизированных характеристик. Поскольку хаотическая динамика гидрометеорологических процессов развивается в рамках определенной структуры, то любые проявления упорядоченности видимо следует искать в соответствующем фазовом пространстве (координаты — расходы и переменные состояния речных бассейнов), а не привычными методами анализа пространственных корреляционных функций.

Неравновесность динамики планетарной климатической системы, обладающей способностью непредсказуемым образом реагировать даже на слабые колебания прихода солнечной радиации, обусловленные изменчивостью земной орбиты, приводят к хаотическим флуктуациям и неустойчивостям в распределении осадков и температуры на всех масштабных уровнях. Все это находит свое немедленное отражение в процессах формирования стока. Интересно, что основные закономерности строения пространственно-временных структур полей интенсивности формирования стока пока остаются неизвестными.

На пути решения этой проблемы стоит объективное препятствие: сведения о стоке существуют только в виде величин, осредненных по площади.

Реальные попытки изучения закономерностей пространственно-временных колебаний характеристик стока до сих пор относились только к годовым значениям среднего и экстремального стока и при условии отделения пространственного анализа от временного. Пространственный анализ сведен к построению соответствующих корреляционных функций этих характеристик. При этом следовало бы иметь в виду ряд моментов, которые замалчиваются:

- классический корреляционный анализ для ненормальных случайных величин всегда неполноценен;
- речные бассейны имеют разные площади, а следовательно, и разные степени пространственного осреднения величин стока;

• анализ проводится средствами, пригодными исключительно для случайных полей в условиях оправдываемости гипотезы однородности и изотропности.

Поэтому не случайно, что коэффициенты корреляции между характеристиками стока для всех возможных пар речных бассейнов как функции расстояний между центрами тяжести этих бассейнов на территориях в несколько сот тысяч квадратных километров имеют колоссальный «рассев» почти во всем диапазоне своих возможных значений: $r > 0$, а иногда и $r > -0{,}5$. Таким образом, в природе существуют разномасштабные статистические закономерности пространственного распределения характеристик стока, но видимо совсем не те, которые до настоящего времени были сформулированы некоторыми апологетами стохастической гидрологии.

Возможно, следует упомянуть о популярной среди некоторых гидрологов так называемой эргодической гипотезы, заключающейся в том, что при некоторых условиях пространственные и временные кривые распределения характеристик стока практически должны совпадать. Идея пространственного объединения рядов наблюдений за стоком в пределах некоторой условно однородной территории напрямую связана с этой гипотезой. Здесь, однако, наблюдается некое противоречие. С одной стороны, для объединения рядов или для построения кривых распределения характеристик стока по данным за один год, но по разным бассейнам разных размеров, эти данные необходимо нормировать. Но с другой — все манипуляции необходимы для оценки параметров кривых распределения, именно тех самых параметров, с помощью которых может быть проведена операция нормирования. По сути дела вся «проблема» может быть сведена к достаточно правдоподобному утверждению: закон распределения характеристик стока одинаков для временных и пространственных рядов наблюдений. Задача же оценки параметров этого закона, естественно кроме традиционной возможности, при этом остается открытой.

2.1.11. Движение воды по русловой сети

Течение воды по бороздам, рытвинам, тальвегам и руслам — явление, завершающее единый процесс формирования стока. Очень трудно во всех деталях проследить за особенностями движения вод на их последнем пути к замыкающему створу. Следует учитывать, что движение половодий и паводков всегда неравномерное и неустановившееся.

Считается общепринятым, что из одномерных моделей наиболее полно учитывает особенности неустановившегося движения воды в открытых руслах система уравнений Сен-Венана:

$$\beta_1 \frac{\partial V}{\partial t} + \beta_2 V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{V|V|}{C^2 H} + \frac{Vq}{H} = g\left(\sin\alpha - \frac{\partial H}{\partial x}\right); \qquad (2.1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + H \frac{\partial V}{\partial x} = q. \qquad (2.2)$$

Здесь t, x, H, V, α — соответственно время, расстояние по стрежню русла, глубина, средняя по поперечному сечению скорость потока и угол наклона русла; q — боковой приток на единицу длины русла; C — коэффициент Шези; $1 < \beta_1 < 1{,}3$ и $1{,}1 < \beta_2 < 6$ — коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения скоростей по поперечному сечению потока.

Если в уравнении (2.1) опустить инерционные члены и не учитывать боковой приток, то оно превращается в уравнение Шези $V = C\sqrt{H \sin\alpha}$, которое вместе с уравнением неразрывности (2.2) составляет широко используемую модель кинематической волны. К сожалению, неопределенности при назначении величин коэффициентов β_1 и β_2, теоретическая и практическая неполноценность коэффициента Шези, очевидная неквадратичность зависимости скорости от уклона и глубины, заставляют полагать, что на смену уравнениям Шези и Сен-Венана должны прийти новые модели. Но настоящие перспективы появятся только после широкой систематизации их параметров.

2.1.12. Сопутствующие явления

Многие природные процессы, сопутствующие формированию стока и течению воды в реках, относятся к разряду опасных или вредных гидрологических явлений. Это наводнения, разного рода прорывные паводки, эрозия почвы, селевые потоки, оползни и многое другое.

Если текущая вода по каким-либо причинам не умещается в русле, то она выходит из берегов и затопляет окружающую территорию. Здесь течение замедляется или становится вообще невозможным, что способствует застаиванию воды и еще большему затоплению. Среди причин такой ситуации могут быть названы три:

- исключительно большой приток воды в результате стремительного снеготаяния или обильных ливней в бассейне реки;
- ветровой нагон воды в устьевых областях рек;
- неожиданное возникновение преграды течению реки — завалы, оползни, ледяные плотины, заторы и зажоры.

Чрезмерное затопление территории называют ***наводнением***. Сильные наводнения — это всегда бедствие. Наиболее сложно су-

дить о возможных размерах наводнений, вызванных первой причиной. Эти размеры всегда связаны с величиной максимальных расходов, но далеко не однозначно. Полное представление об источнике наводнения может дать только гидрограф стока.

Для определения возможных площадей и выделения конкретной территории затопления необходимо иметь информацию о соотношении расходов и уровней воды по длине реки и о взаимодействии речного потока с окружающей местностью при тех или иных его уровнях и скоростях. Многочисленные локальные особенности, обычно не отражаемые даже на крупномасштабных картах, вносят свои коррективы в общую картину. Реальное представление о зонах затопления при наводнениях могут дать, пожалуй, только аэро- и космические снимки.

Второй вариант наводнения определяется расходом притекающей сверху воды и степенью ветрового воздействия, затрудняющего выход этой воды в море или озеро.

В случае возникновения природной плотины проблема состоит не столько в выделении возможной зоны затопления, что не очень сложно, а в выяснении прочности завала и оценке сроков и величины возможного прорыва. Крупные прорывные паводки относятся к числу самых ужасных природных катастроф.

Сель — это горный поток, состоящий из смеси воды и рыхлообломочной горной породы. Плотность селевых потоков колеблется в широком диапазоне — от 1 100 до 2 500 кг/м^3. Наряду с плотностью поведение селевой массы определяется ее составом (относительным объемом частиц разных размеров). В зависимости от состава и плотности селевой массы различаются три типа селей: наносоводные, грязевые и грязекаменные.

Селевые потоки подробно рассматриваются в подразд. 6.5.

Оползень — это явление смещения вниз по склону массы рыхлой горной породы под влиянием гравитационных сил. Обычно определяющую роль в формировании оползней играет обводнение породы. Оползневый процесс во многом сходен со сдвиговым селевым процессом, но при нем сохраняется полностью или частично цельность перемещающегося массива породы. Возможно, именно поэтому этот массив даже после полной остановки продолжают называть «оползнем». Однако так называемые оползни-потоки от селевых уже неотличимы. Одновременное массовое возникновение оползней может случиться при сейсмических ударах.

Общий ***процесс эрозии*** (он же процесс формирования твердого стока) делится на два этапа: бассейновый (площадной) и русловой (линейный). Первый этап связан с поверхностным стокообразованием, эрозионным размывом почв, слагающих поверхность водосбора, и поступлением в русловую сеть мелкозема. Второй этап — процесс взаимодействия потока суспензии с русловым

аллювием или пролювием. Активность склоновой эрозии определяется интенсивностью поверхностного стока и податливостью почвы или рыхлой горной породы размыву.

Тесно связаны друг с другом процессы формирования стока и ***миграции загрязняющих веществ***, поступающих на поверхность речных бассейнов.

2.2. Речной сток на планете Земля

Средний годовой водный баланс суши нашей планеты составляет (округленные цифры по недостаточно полным и точным оценкам), мм: осадки — 760, испарение — 460 и сток — 300.

В среднем в Мировой океан и внутриматериковые бессточные бассейны непрерывно вливается поток воды с расходом 1,36 млн $м^3/с$ и еще 90 тыс. $м^3/с$ воды поступает в твердом состоянии (откалывание айсбергов и сдувание снега с ледяных куполов Антарктиды и Гренландии в море). Приводимые здесь и ниже сведения о стоке с континентов и по отдельным рекам получены в результате пересчета данных о водных ресурсах Земли [17, 30].

Суммарный расход рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, составляет 136 тыс. $м^3/с$ (плюс 20 тыс. — айсберги), в Атлантический — 641 тыс., в Индийский — 166 тыс., в Тихий — 389 тыс. и в Южный (объединенные крайние южные части трех предыдущих океанов, омывающих Антарктиду) — 70 тыс. (в основном айсберги). Таким образом, по разные стороны Главного водораздела земной суши стекают воды с расходами 623 тыс. (Тихоокеанский склон) и 799 тыс. $м^3/с$ (Атлантический склон). Вклад отдельных континентов в мировой речной и «айсберговый» сток представлен в табл. 2.1.

Таблица 2.1. **Вклад отдельных континентов в мировой речной и «айсберговый» сток**

Континент	Расход воды, тыс. $м^3/с$	Слой стока, мм
Европа	92	276
Азия	428	311
Африка	133	139
Северная Америка	275	352
Южная Америка	383	680
Австралия	10	40
Океания	66	1 646
Антарктида	70	158

Интересно, что средний многолетний модуль стока суши мира (без Антарктиды и Гренландии) составляет 10 л/с · км^2.

Особый интерес представляют собой разного рода «чемпионы стока».

Ниже приведены площади бассейнов, средние многолетние годовые расходы, модули и слои стока крупнейших рек мира (табл. 2.2) [30]. В списке 15 рек с расходами более 10 тыс. м^3/с. При его составлении пришлось столкнуться с умозрительными решениями при некоторых гидрографических неопределенностях. Например, считать ли некую территорию одним бассейном или нет? Особые сложности создают эстуарии, куда впадают вроде бы разные реки, или же дельты, объединяющие сток двух рек и более. Таковы Ла-Плата с Параной и Уругваем; Бенгальская дельта, суммирующая сток Брахмапутры, Ганга и Мегхны; Чжуцзян, довольно условно объединяющая бассейны рек Сицзян, Бейцзян и Дунцзян; Амазонка со своим извечным вопросом — включать или не включать в ее бассейн реку Токантинс? Некоторые неопределенности вносят неточности оценок расходов разных рек. В результате уточнения некоторых цифр может измениться иерархический по-

Таблица 2.2. **Характеристики крупнейших (по величине средних многолетних расходов) рек мира**

Название реки	Площадь бассейна, тыс. км^2	Расход воды, м^3/с	Модуль стока, л/с · км^2	Слой стока, мм
Амазонка	6 920	219 312	31,7	1 000
Брахмапутра — Ганг — Мегхна	1 750	4 4021	25,2	794
Конго	3 500	41 200	11,8	371
Ориноко	1 000	32 009	32,0	1 010
Чанцзян (Янцзы)	1 810	31 788	17,6	554
Парана — Уругвай	3 100	25 703	8,3	262
Енисей	2 580	20 347	7,9	249
Лена	2 490	17 082	6,9	216
Миссисипи	2 980	16 322	5,5	173
Меконг	790	16 005	20,3	639
Чжуцзян	454	13 640	30,0	947
Обь	2 990	12 804	4,3	135
Амур	1 860	11 251	6,0	191
Маккензи	1 780	10 300	5,8	183
Св. Лаврентия	1 030	10 142	9,8	311

рядок перечисления рек и даже само их присутствие или отсутствие в данном списке. Например, нельзя уверенно утверждать, какая река более многоводна — Ориноко или Чанцзян, Миссисипи или Меконг.

Тем не менее даже условный список стоковых гигантов необычайно интересен.

При прочих равных условиях, чем больше площадь речного бассейна или вообще любой территории, тем менее значительны колебания годового стока.

Для перечисленных выше «стоковых гигантов» коэффициент вариации годовых величин стока колеблется от 0,03 (Ганг — Брахмапутра) до 0,26 (Ла-Плата), для отдельных континентов от 0,06 (Северная Америка) до 0,10 (Африка и Австралия с Океанией), для притока в океаны от 0,04 (Атлантический) до 0,11 (Тихий), для суши в целом — 0,025. Приведенные цифры свидетельствуют о приблизительном постоянстве глобального речного стока. Но столь же очевидны значительные пространственно-временные колебания поля годового стока территории суши. Они тем больше выражены, чем меньше масштаб рассмотрения.

Предельной изменчивостью обладает поле стока, рассматриваемое с микромасштабных позиций, т. е. когда оно представлено множеством величин годового стока всех элементарных водосборов мира.

Некоторые уголки суши отмечены крайними проявлениями интенсивности процессов формирования стока. И здесь уже уместно вести разговор об элементарных и малых водосборах.

В междуречье нижней Брахмапутры и Мегхны расположено плато Шиллонг. Южный короткий склон его круто спускается к равнине и известен как самое дождливое место на Земле. Именно здесь расположено знаменитое селение Черапунджи, где находится метеорологическая станция, зафиксировавшая максимальные суммы осадков как за год, так и за многолетний период. Средняя годовая их сумма, по разным источникам, здесь составляет 11—12 тыс. мм.

Черапунджи расположено на наклонном отроге плато, крутые южные склоны которого спадают к равнине, а восточные и западные к ущельям малых рек Варио и Богопани и их притоков. Местность здесь скалистая, бесплодная, почти лишенная растительности, но только там, где бушует эрозия. Совсем рядом склоны покрыты густым лесом. В шести километрах к юго-востоку от Черапунджи один из правых притоков реки Варио образует водопад Мавсмаи высотой 351 м. Возможно именно этот малый водосбор с замыкающим створом на водопаде и является «чемпионом мира» по стоку.

Можно полагать, что средний годовой сток малых водотоков окрестностей Черапунджи составляет более 10—11 тыс. мм, а в

отдельные годы значительно превышает эту цифру. Так, в 1856 г. годовой сток видимо достиг величины 22 тыс. мм. Названные цифры отображают максимальные возможности природы по формированию стока.

Возможные «соперники» Черапунджи, которые не попали в поле зрения метеорологов, могут находиться, помимо его ближайших окрестностей, где-нибудь на высотах 1 000—1 400 м южных склонов плато Шиллонг на протяжении 200—250 км от бассейна реки Буги (хребет Тура) на западе до бассейна реки Лубха на востоке. В частности, есть сведения о том, что пальма первенства принадлежит вовсе не Черапунджи, а его западному соседу (15 км) Маусандраму.

Среди других районов мира, отмеченных выдающимся стоком на малых водосборах, могут быть названы:

- западный и юго-западный склоны вулкана Камерун;
- западные склоны бирманских хребтов Аракан-Йома (Ракхайн) и Тенассерим (Танинтайи), обращенные соответственно к Бенгальскому заливу и Андаманскому морю;
- наветренные склоны Западных Гат на полуострове Индостан, начиная от района горы Махабалешвар и далее на юг вдоль Малабарского берега;
- Кардамоновы горы (Кравань) в Таиланде и Кампучии;
- северные отроги хребта Цыгаошань на острове Тайвань;
- остров Реюньон в Индийском океане и остров Кауаи (а возможно и все Гавайи) в Тихом;
- Тихоокеанский склон Западной Кордильеры в районе колумбийского города Буэнавентура.

Судя по обилию воды на высочайшем в мире водопаде Анхель, незначительной площади плато Ауян-Тепуи, ограниченного со всех сторон более чем километровыми обрывами, и предполагаемым климатическим условиям внешнего края Гвианского нагорья можно сделать интересное предположение о малом водосборе реки Чурун как о своего рода уникальном стоковом чемпионе.

Существуют на планете и территории, где сток практически не формируется. Среди них, в первую очередь, могут быть названы наиболее засушливые участки пустыни Сахары:

- Ливийская пустыня, особо суровая и мрачная;
- Феццан, примыкающий к ней с запада;
- голые плоские равнины, Танезруфт — западнее массива Ахаггар и Тенере — восточнее плато Аир;
- Тидикельт, песчаная равнина с группой оазисов к югу от плато Тадемаит.

Другие не менее безводные районы — это береговые равнины и предгорья Андийских хребтов на огромном расстоянии между пустынями Сечура и Атакама (5—28° ю. ш.) в Перу и Чили, а также Турфанская впадина и полоса предгорий Куньлуня с при-

легающей частью Таримской равнины с эпицентром у Черчена в Центральной Азии.

Еще один вид стоковых чемпионов — это места особо крупного сосредоточенного выхода на поверхность подземных вод. Здесь названы четыре таких выдающихся источника:

- Мчишта в Абхазии у подножия Бзыбского хребта, расход до 200 $м^3/с$;
- Люта на Адриатическом побережье Черногории в горах, примыкающих к Которской бухте, расход до 170 $м^3/с$;
- Воклюз у подножия одноименного плато в 22 км восточнее Авиньона во Франции, расход до 110 $м^3/с$;
- Красный ключ на левом склоне долины р. Уфы расход до 110 $м^3/с$. Это, видимо, один из крупнейших в России источников.

2.3. Сток и человек

2.3.1. Общие положения

Вода и жизнь на Земле неразделимы. Интерес к воде возник вместе с появлением человека. И нет для него более важных веществ, чем вода и воздух. Но пресная вода — это именно то жидкое вещество, о стоке которого и идет речь.

История человеческих цивилизаций тесно связана с реками, на берегах которых они возникали, торжествовали, терпели бедствия и умирали. Это Нил, Иордан, Тигр и Евфрат, Хуанхэ и Янцзыцзян, Волга и Днепр, Керулен, Рейн и Сена, Инд и Ганг, Иравади и Меконг и др. Когда звучат названия этих и других рек, то всем ясно, судьба каких народов с ними связана.

Люди пользовались водой и реками сначала без особых рассуждений, затем более осмысленно, затем появился уже неиссякаемый до сих пор интерес к причинам, особенностям и закономерностям формирования стока. Поэтому естественно, что и современное человечество использует речной сток, защищается от него, включает его в систему своих основных жизненных ценностей, изучает его, старается на него воздействовать.

2.3.2. Система наблюдений за осадками и стоком

Если существует такое природное явление, как поверхностный сток, которое играет важнейшее значение в жизни человека (хотя последний не всегда это отчетливо сознает), то естественно создание системы наблюдений за этим явлением. Сеть

гидрологических станций, ведущих гидрометрические наблюдения за водным режимом рек и озер, необходима как для хозяйственной деятельности человечества, так и для развития гидрологической науки — фундаментальной и прикладной. В большинстве стран организованы специальные службы — гидрологические, гидрометеорологические или носящие другие названия. Всего на поверхности земной суши глобальная гидрологическая сеть насчитывает 64 тыс. станций, на которых ведутся наблюдения за уровнями и расходами рек, и 194 тыс. станций, измеряющих количество осадков. Вообще выпадение осадков часто формально причисляют к метеорологическим явлениям, и это так, однако для проблемы стока оно является во многом определяющим, ибо открывает наземную часть гидрологического цикла.

Исключительно важна для развития гидрологии малая гидрологическая сеть, состоящая из водно-балансовых станций и разного рода бассейнов — исследовательских, репрезентативных, экспериментальных. Именно на этих объектах проводятся подробные и всесторонние наблюдения, столь необходимые для построения теории формирования стока.

2.3.3. Использование стока и проблема водных ресурсов

Если с позиций утилитаризма полагать, что «водные ресурсы» есть воды суши, которые в принципе могут быть использованы человеком для своих потребностей, то гидрологически — это запасы воды в твердом и жидком состоянии (за исключением химически и физически связанной) в речном бассейне или на любой территории в каждый данный момент времени. Количество и качество водных ресурсов непрерывно изменяются во времени и пространстве. Водные ресурсы могут быть:

- заменимыми или незаменимыми;
- возобновляемыми или невозобновляемыми;
- пригодными или непригодными;
- используемыми или неиспользуемыми.

Представленные определения очевидны, но некоторые требуют пояснений. Заменимыми водные ресурсы могут быть только в плане их энергетического и транспортного использования. К невозобновляемым ресурсам следует отнести воды нижних ярусов насыщенной зоны, мертвых объемов глубоких озер, ледников, на восстановление которых должны быть затрачены отрезки времени, многократно превышающие годовой. Объем возобновляемых водных ресурсов определяет величина среднего годового стока. Непригодность вод может быть следствием плохого их качества (засоленности, загрязненности).

Водопользование может быть безвозвратным и возвратным. В последнем случае оно может осуществляться с изменением или без изменения качества воды. Различают несколько направлений использования водных ресурсов:

- коммунально-бытовое;
- промышленное;
- сельскохозяйственное (в том числе ирригационное);
- энергетическое;
- транспортное;
- рекреационное (в том числе туристическое).

Иногда в понятие «водные ресурсы» не включают запасы влаги в почве, от которых целиком зависит эффективность земледелия, что, видимо, неверно.

И, наконец, использование водных ресурсов может быть рациональным, и наоборот. Рациональность в данном случае состоит в минимизации нанесения ущерба природе, водным объектам, хозяйству, физическому и духовному состоянию человека. К сожалению, XX в. неоднократно отмечен дорогостоящими мероприятиями, которые в конце концов приводили именно к такому ущербу.

В настоящее время водные ресурсы планеты, пригодные для использования, уменьшаются (в основном из-за загрязнения), а потребность в воде, наоборот, возрастает. В течение XX в. глобальное водопользование увеличилось приблизительно в семь раз, что в два с лишним раза превышает темпы роста населения. В то же время доля глобального стока на душу населения мира неуклонно снижается: в 1970 г. она составила 12 900 м^3 в год на одного человека, а в 1995 г. — уже только 7 600. Величины водозабора и водопотребления представлены в табл. 2.3.

Приведенные в табл. 2.3 цифры свидетельствуют о большой доле непроизводительного расходования воды.

Можно утверждать, что планета Земля, на которой мы живем, — мир истощающихся запасов воды. И водные ресурсы этого мира должны не только использоваться, но и быть сохранены для будущих поколений.

Таблица 2.3. **Современная структура водозабора и потребления в различных отраслях**

Отрасль	Водозабор, %	Потребление, %
Сельское хозяйство	70,1	93,4
Промышленность	20,0	3,8
Городское хозяйство	9,9	2,7

2.3.4. Антропогенные воздействия на сток

Существуют по меньшей мере два основных пути влияния человека на сток. Это оказание воздействия на климат и погоду, с одной стороны, и на природные ландшафты как на стокоформирующие комплексы, с другой. Горько сознавать, что Homo sapiens XX в. даже и не пытался обдуманно и с благой целью оказать влияние на сток, используя оба эти канала. Напротив, он постоянно действовал якобы в общечеловеческих интересах, не задумываясь о том, что творит. Последствия же для природы вообще и для стока в частности оказались грандиозными.

На смену природным ландшафтам пришли антропогенные, достигшие своего крайнего воплощения в современных городах и мегаполисах. Асфальт, бетон, стекло, металл, пластик — все эти непременные атрибуты урбанизации так или иначе оказывают свое специфическое влияние на формирование стока. Города как совершенно особые стокоформирующие комплексы при прочих равных условиях характеризуются повышенным стоком и пониженным испарением. Быстрому сбросу ливневых и талых вод с городских территорий способствует система канализации.

Вне городов были вырублены коренные леса, на их месте появились леса вторичные, пастбища и поля. Были вспаханы степи. При этом многие попутные целесообразные и необходимые действия игнорировались. Первые гидрологические объекты поверхности суши, принесенные в жертву болезненным явлениям цивилизации, — это бассейны и русла малых рек. «Какие они были, и что с ними стало!..» — таково эмоциональное суждение миллионов людей, еще не полностью потерявших связь с природой. Изменение на водосборах и берегах рек водно-физических свойств почв при загрязнении, деградации, трамбовке и вытаптывании последних привело к исчезновению родников, обмелению рек, смене береговой растительности, гибели большей части животного мира. На средние и большие реки распространяется все сказанное для малых рек, но это воздействие более интегрально и менее заметно на глаз.

В рассматриваемом плане в гидрологии была выделена проблема влияния на сток хозяйственной деятельности. Эта проблема, имеющая большое принципиальное и прикладное значение, обычно решалась способом «восстановления» стока по данным наблюдений специально выделенных для этого бассейнов-индикаторов и по некоторым упрощенным водно-балансовым моделям, числовые коэффициенты которых оценивались по данным наблюдений за период, принятый естественным.

Второе, вначале неосознанное, воздействие человека на природу постепенно приводит к глобальному изменению климата. Имеется в виду антропогенный вклад в увеличение парникового эф-

фекта в результате выброса в атмосферу углекислого и других газов в основном в результате сжигания ископаемого топлива. Глобальное потепление и, как следствие, локальные систематические климатические отклонения могут оказать решающее влияние на осадки и сток. Прогнозирование возможных изменений климата и гидрологических последствий этого факта пока сохраняет большую степень неопределенности. Не доказан и сам факт выраженного потепления.

Оценки реакции процессов стока на антропогенные изменения климата в соответствии с предполагаемыми или прогнозируемыми по климатическим моделям сценариями обычно осуществлялись по водно-балансовым уравнениям или корреляционным зависимостям стока от осадков и температуры воздуха (с не очень правомочной экстраполяцией этих зависимостей в изменяющихся условиях).

Методологически более надежным и перспективным подходом к одновременному решению обеих названных задач представляется распределенное математическое моделирование с четким постулированием количественных изменений климатических величин и параметров ландшафтов.

Главный негативный результат антропогенного воздействия на сток — его загрязнение. С гидрологической точки зрения существуют два принципиально различных варианта процессов загрязнения стока — бассейновый и русловой.

Первый вариант связан с оседанием и выпадением загрязняющих веществ из атмосферы на поверхность речных бассейнов. Дальнейшая судьба этих веществ тесно связана с процессом формирования стока. В зависимости от масштабов территории, охваченной данным видом загрязнения, оно может быть классифицировано как глобальное, региональное и локальное.

После попадания загрязнителя на поверхность водосбора происходит его распределение между носителями загрязнения, главнейшими из которых являются вода и почва. В дальнейшем загрязнитель и его производные присутствуют в пределах речного бассейна в следующих ассоциациях: в биоценозе (избирательно в различных видах), в почвенном веществе, в почвенных, подземных, озерных, болотных и текучих водах, в донных отложениях рек и водоемов, в рыхлообломочных отложениях конусов и полей выноса. Время «хранения» загрязнителя, отвечающее его динамичности, колеблется в самых широких пределах — от часов до многих лет и даже столетий.

Следует иметь в виду два вида загрязнения, различающиеся по форме взаимоотношения воды и загрязнителя (растворимый и нерастворимый загрязнители). Растворимый загрязнитель вместе с водой проникает в почву. Часть его адсорбируется почвенными частицами. Между концентрацией раствора и адсорбционными

возможностями почвы существует определенное соотношение. Кривая, отображающая такое соотношение, носит название изотермы адсорбции. Если не будет новых поступлений загрязнителя, то в процессе инфильтрации талой и дождевой воды он постепенно будет вымыт из почвы и поступит в подземные воды, где и будет пребывать, постепенно истощаясь, определенное время. Участие подземных вод в переносе растворимого загрязнителя растягивает процесс загрязнения и последующей реставрации на долгие десятилетия и столетия.

Судьба нерастворимого загрязнителя неразрывно связана с эрозией почвы, и его смыв вместе с почвенными частицами возможен только при формировании поверхностного стока.

Второй вариант процесса загрязнения более прост: загрязнитель сбрасывается непосредственно в русловую сеть или попадает туда в результате каких-либо происшествий или при технических катастрофах.

ГЛАВА 3
ФОРМИРОВАНИЕ СТОКА И ДИНАМИКА ВОДЫ В РЕЧНОМ БАССЕЙНЕ

3.1. Проблема

Формирование стока — сложный многофакторный процесс. Он складывается из большого числа частных процессов, регулируемых прямыми и обратными связями и локализованных в границах речного бассейна. Последний воспринимает, перераспределяет, аккумулирует, рассеивает и направляет потоки вещества (осадки, сток, испарение) и энергии (радиационный и конвективный теплообмен), приходящих извне и туда же уходящих. Поэтому под процессом формирования стока следует понимать не только непосредственное появление воды, способной к дальнейшему стеканию, а весь комплекс определенной группы частных процессов, которые все вместе составляют наземную часть гидрологического цикла (круговорота воды в природе).

Представим себе реальный речной бассейн с его рельефом и ландшафтами, орошаемый дождями и засыпаемый снегом, воспринимающий потоки солнечной радиации и контактирующий с воздушным океаном — с его ветрами, облачностью, теплом и холодом. Происходит взаимодействие метеорологических полей с подстилающей поверхностью в виде своего рода мозаики, сложенной дискретными ландшафтными образованиями.

Речной бассейн со своими орографией, горными породами, подземными водами, почвенным и растительным покровами, гидрографической сетью, водоемами и объектами, созданными человеком, в отношении попадающей в его пределы воды выполняет двойную функцию: с одной стороны, он наряду с погодой определяет соотношение между осадками, стоком и испарением (водный баланс), с другой — осуществляет перераспределение стока во времени (трансформация).

Сток обычно естественным образом подразделяют на талый и дождевой. Формирование второго из них — относительно более стремительно и бурно протекающий процесс, чем первого. Важным является тот факт, что оба вида стока взаимодействуют и дополняют друг друга. Но только в природе. В традиционной гидрологии они, увы, разделены с начала и до конца.

Следует различать еще два вида стока — поверхностный и подземный. Последний, в свою очередь, может быть подразделен на

несколько категорий в зависимости от глубины проникновения талых и дождевых вод в толщу почвы и горных пород (ярусность подземного стока), а следовательно, по степени их зарегулированности.

Важен вопрос о соотношении поверхностного и подземного типов стокообразования. Первые известные теории стока, основанные на непосредственных наблюдениях, связаны с постулатом о поверхностном стекании. Отклонения от этого привычного правила обычно расценивались как исключительные. Приблизительно в это же время стало популярным отрицание самой возможности формирования паводков грунтовым стоком. Попытка доказательства ничтожности максимального модуля подземного стока была основана на сравнении коэффициентов фильтрации со скоростями поверхностного стекания. В действительности в местах формирования быстрого грунтового стока развита густая подземная дренажная сеть, в которой скорости течения дождевых и талых вод могут быть лишь на порядок ниже поверхностных.

Затем маятник качнулся в обратную сторону, и сейчас можно встретить в литературе не только по гидрологии, но и по смежным дисциплинам утверждения о достаточно незначительной роли классического поверхностного стока.

Поверхностному и подземному типам формирования стока соответствуют и два вида паводкового стока. Паводки, сформированные поверхностным стоком, характеризуются более высокими максимальными модулями стока, кратковременностью прохождения, резкой реакцией на изменения интенсивности дождя, что становится особо заметным с уменьшением площади водосбора.

Дождевые и талые воды, просочившиеся сквозь почвенно-грунтовую толщу и рано или поздно достигшие русла, относят к различным категориям подземного стока. Пути и время миграции таких вод зависят от структуры почв и горных пород и могут быть самыми различными. Если время от начала выпадения дождя на поверхность водосбора до момента выклинивания воды в русловую сеть не настолько велико, чтобы отдельная паводковая волна потеряла свою индивидуальность, можно говорить о быстром грунтовом стоке. Он всегда значительно более зарегулирован, чем поверхностный, и определение «быстрый» призвано оттенить его отличие от подлинно подземного стока. Очевидно, что резкая граница между всеми тремя видами стока отсутствует.

Оба вида паводкового стока (поверхностный и быстрый грунтовый) широко распространены в горах и на равнинах и, как правило, в пределах каждого речного бассейна совместно принимают участие в питании русловой сети.

Теперь перечислим частные процессы, которые составляют комплекс явлений, называемый формированием стока.

1. Процессы и явления на поверхности бассейна.

1.1. Выпадение осадков. Их фазовое состояние определяет различие в судьбе воды в начальный период истории ее пребывания в пределах речного бассейна.

1.2. Обмен тепловой энергией поверхности бассейна с атмосферой и космическим пространством.

1.3. Перехват дождевых капель растительным покровом. Снег, задержавшийся на кронах деревьев, особенно хвойных, — великолепное зрелище, но гидрологически это временное явление: очень скоро ветер и солнце сбросят его вниз.

1.4. Формирование снежного покрова. Этот комплексный процесс отображается изменением четырех его переменных состояния — толщины, плотности, соотношения количества «жидкой» и «твердой» воды и температуры.

1.5. Снеготаяние и разрушение снежного покрова.

1.6. Водоотдача из снега.

1.7. Инфильтрация и формирование поверхностного стока, являющиеся совместно одним из самых важных частных процессов рассматриваемого комплекса; в отношении судьбы воды, попадающей на поверхность водосбора, выступают в роли процесса-делителя [25].

1.8. Задержание части поверхностного стока в бессточных отрицательных формах микрорельефа склонов.

1.9. Дорусловая трансформация поверхностного стока вследствие накопления и стекания воды на поверхности склонов.

2. Процессы и явления в почве и приповерхностной толще горной породы.

2.1. Динамика тепловой энергии.

2.2. Динамика почвенных вод — один из важнейших и сложнейших процессов, складывающийся из задержания воды в толще почвы и реголита, ее расходования на испарение и формирование почвенного и подземного стока [23, 24, 26].

2.3. Испарение (безвозвратные потери стока).

2.4. Подземный сток и его дорусловая трансформация, сказывающаяся в распределении последнего по ярусам геологических структур приповерхностной толщи земной коры в пределах речного бассейна и последующей разноскоростной разгрузки подземных емкостей в русловую сеть.

3. Русловая трансформация и трансляция в замыкающий створ воды, попадающей в гидрографическую сеть речного бассейна, которые заключаются в перераспределении этой воды во времени.

4. Сток воды в замыкающем створе — итог взаимодействия рассмотренного комплекса процессов.

3.2. Физические свойства воды, льда, снега, почвы, реголита и горных пород

3.2.1. Вода, лед и скальные горные породы

Под совместным влиянием поступления воды и тепловой энергии способность речного бассейна воспринимать, удерживать и отдавать воду непрерывно меняется. Динамика влажности и фазовые переходы определяют большую изменчивость физических свойств снега, почв и горных пород. Известно довольно много эмпирических формул, удачных и неудачных, для вычисления некоторых из этих свойств.

Перечисленные в заголовке этого маленького подраздела природные вещества могут быть условно выделены как не меняющие свои физические свойства. Лед и скальные (монолитные) породы в массиве или их крупные обломки также имеют пористость, иногда изменяющуюся в довольно широких пределах. Для интрузивных и метаморфических пород она обычно ниже 0,01. Пористость пузырчатых базальтов доходит до 0,25, в то время как массивных обычно не превышает 0,06. Некоторые разновидности известняков и доломитов имеют очень высокую пористость: 0,35—0,45. Однако, как правило, эта пористость является закрытой и почти недоступной для проникновения в нее влаги. Поэтому будем условно, в рамках наших гидрологических задач, считать, что для льда и скальных грунтов пористость равна нулю, и ограничимся приведением осредненных показателей.

Вода и лед: плотность 1 000 и 920 кг/м^3; удельная теплоемкость 4 190 и 2 090 Дж/(кг · °С); коэффициент теплопроводности 0,58 и 2,22 Вт/(м · °С); удельная теплота плавления (замерзания) $334 \cdot 10^4$ Дж/кг; удельная теплота парообразования (конденсации) $248 \cdot 10^4$ Дж/кг.

В табл. 3.1 приведены плотность и два главных теплофизических показателя некоторых важнейших типов скальных пород, кото-

Таблица 3.1. **Характеристики некоторых скальных пород**

Горная порода	Тип горной породы	Плотность, кг/м^3	Удельная теплоемкость, Дж/(кг · °С)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С)
Гранит	Изверженная интрузивная	2 650	670	3,5
Диорит	То же	2 820	630	2,5

Окончание табл. 3.1

Горная порода	Тип горной породы	Плотность, кг/м³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг · °С)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С)
Базальт	Изверженная эффузивная	2960	840	2,5
Диабаз	То же	2900	710	2,4
Гнейс	Метаморфическая	2650	750	3,2
Глинистый сланец	То же	2650	750	2,3
Известняк	Осадочная	2720	850	3,4
Доломит	То же	2850	920	4,0
Песчаник	»	2650	940	4,5

рые посчитаем не изменяющимися от состояния погоды, как это имеет место для почв или скоплений обломочных пород.

3.2.2. Многофазная дисперсная среда и ее теплофизические свойства

Под дисперсной средой будем понимать природные смеси твердых частиц разных размеров, жестко не связанных друг с другом. Более общее понятие — многофазная дисперсная среда. Для нас — это снег, почва, органические горизонты, обломочная горная порода.

Элементами дисперсной среды также являются «почвенная плазма» и «реголит», термины, обычно малоупотребительные в гидрологии. Почвенная плазма — активная часть почвы, минеральный и органический материал коллоидных размеров; противопоставляется почвенному скелету.

Реголит — общий термин, используемый для обозначения всех поверхностных рыхлых образований любого происхождения и весьма разного характера. В принципе почва — это тоже реголит. Однако будем применять этот термин, выделяя из него почвы как достаточно специфические образования, возникшие под воздействием животных и растительных организмов и имеющие реголит минерального происхождения в качестве субстрата. Поэтому дальше в тексте будут использоваться словосочетания «почва и реголит» или «почва-реголит».

Взаимодействие дождевых и талых вод с почвенно-растительным покровом и реголитом лежит в основе многофакторного процесса, который мы называем формированием стока. «Почва — своего рода посредник между климатическими и гидрологическими явлениями» (М. И. Львович, 1986), поэтому не случайно появление таких научных ответвлений, как почвенная гидрология и гидрофизика почв.

Среди необходимых свойств природных дисперсных сред при гидрологических исследованиях и моделировании важны следующие:

- общие физические — плотность вещества, плотность в естественном залегании, пористость;
- водно-физические — доля связанной влаги, максимальная водоудерживающая способность, коэффициент фильтрации;
- теплофизические — удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности

Удельная теплоемкость. Для многофазной дисперсной среды знание относительного объема, занимаемого обломками и частицами горной породы, почвенной плазмой, органическим веществом, водой или льдом и воздухом, позволяет вычислить ее объемную теплоемкость

$$c = p\rho(1-\varepsilon) + p^{\cdot}\rho^{\cdot}u^{\cdot};$$
$$c = p\rho(1-\varepsilon) + p^{*}\rho^{*}u^{*},$$

где p, $p^{\cdot}$, p^{*} — удельная теплоемкость горной породы или почвенного вещества, воды и льда; ρ, $\rho^{\cdot}$, ρ^{*} — плотность тех же элементов дисперсной среды; ε, $u^{\cdot}$, u^{*} — пористость и объемная влажность («жидкая» и «твердая» вода) почвы или рыхлообломочной породы.

Параметры p и ρ первых членов приведенных уравнений могут быть в свою очередь определены как средние взвешенные величины из вкладов постоянных (в отличие от воды или льда) элементов системы (табл. 3.2).

Таблица 3.2. **Плотность и удельная теплоемкость почвенных фракций**

Минеральные фракции почв	ρ, кг/м^3	p, Дж/(кг · °С)
Пески	2 660	780
Супеси	2 700	830
Суглинки	2 710	840
Глины	2 740	880
Почвенная органика	1 300	1 930

Для объемной теплоемкости снега имеем выражение

$$c_c = p^* \rho^* (1 - \varepsilon_c) = p^* \gamma_c^*,$$

где ε_c — пористость снега; γ_c — плотность твердой фазы сухого снега.

Единица объемной теплоемкости снега в СИ: Дж/(м^3· °С).

Коэффициент теплопроводности. Коэффициент теплопроводности многофазной дисперсной среды уже не может быть определен как средняя взвешенная величина из вкладов отдельных фаз, подобно тому, как это было сделано для предыдущей характеристики. Построим для его вычисления простейшую интерполяционную модель.

Рассмотрим сначала крайние варианты теплопроводящей многофазной системы.

Вариант 1. Система состоит только из твердой и газообразной (воздух) фаз. Это — сухие снег, почва, обломочная порода. Будем полагать, что воздух является абсолютным теплоизолятором и его влияние сказывается не только на факте снижения рабочей части площади поперечного сечения единичной колонки, мысленно выделенной в среде, но и на искривленности, изломанности и разорванности теплопроводящих путей системы. Последнее ведет к дополнительному снижению коэффициента теплопроводности колонки в целом. Предположим, что коэффициент эффективной теплопроводности такой системы пропорционален простейшей степенной функции относительной доли твердого вещества в системе:

$$\lambda_m = \lambda_0 (1 - \varepsilon)^m; \quad m > 1, \tag{3.1}$$

что неплохо подтверждается экспериментальными данными.

Вариант 2. В системе первого варианта воздух заменим водой. Теперь в процессе теплообмена участвует множество теплопроводящих элементов двух типов: твердое вещество и вода, соединенные друг с другом последовательно, параллельно и комбинированно. В данной ситуации удобно ввести суммарный коэффициент теплопроводности. Здесь также возможны варианты.

При последовательном соединении теплопроводящих элементов приравнивание удельных тепловых потоков приводит к следующему выражению для суммарного коэффициента теплопроводности:

$$^{-1}(\lambda_м^*) = \lambda_0 \lambda^* / [\lambda_0 \varepsilon + \lambda^* (1 - \varepsilon)] = (\varepsilon / \lambda^* + (1 - \varepsilon)/\lambda_0)^{-1}. \tag{3.2}$$

При параллельном соединении элементов имеем

$$^{1}(\lambda_м^*) = \lambda_0 (1 - \varepsilon) + \lambda^* \varepsilon. \tag{3.3}$$

Формулы (3.2) и (3.3) представляют собой выражения для вычисления средних взвешенных величин — гармонической и арифметической.

Вариант 3. Заменим воду льдом. Аналогия с вариантом 2 полная, только вместо $\lambda^{\cdot}$ теперь присутствует λ^{*}.

Остается неясным вопрос о преимуществах одной из двух конкурирующих гипотез — о преобладании последовательных или параллельных соединений теплопроводящих элементов в таких дисперсных системах, как снег, почва или обломочная порода, пористость которых частично или полностью занята водой или льдом.

Всегда имеет место соотношение

$$^{-1}(\lambda_{\text{м}}) \le {}^{1}(\lambda_{\text{м}}).$$

К сожалению, экспериментальные данные, имеющиеся в нашем распоряжении, не позволяют отдать предпочтение одной из гипотез. В действительности мы, видимо, имеем нечто промежуточное — сложную комбинацию разного рода соединений. Вспомним, что между гармонической и арифметической средней лежит геометрическая

$$^{-1}(\lambda_{\text{м}}) \le {}^{0}(\lambda_{\text{м}}) \le {}^{1}(\lambda_{\text{м}}).$$

И если мы посчитаем, что средняя взвешенная геометрическая величина нас удовлетворяет, то выражения для $\lambda_{\text{м}}$ приобретут следующий вид:

$$\lambda_{\text{м}}^{\cdot} = \lambda_0^{1-\varepsilon}(\lambda^{\cdot})^{\varepsilon}; \tag{3.4}$$

$$\lambda_{\text{м}}^{*} = \lambda_0^{1-\varepsilon}(\lambda^{*})^{\varepsilon}. \tag{3.5}$$

Использование выражений (3.1), (3.4) и (3.5) позволяет получить достаточно простые интерполяционные уравнения для оценки коэффициента теплопроводности многофазной среды:

$$\lambda = (\lambda_{\text{м}}^{\cdot} - \lambda_m)(w^{\cdot})^n + \lambda_m; \quad n < 1; \tag{3.6}$$

$$\lambda = (\lambda_{\text{м}}^{*} - \lambda_m)(w^{*})^n + \lambda_m; \quad n < 1. \tag{3.7}$$

Здесь $w^{\cdot} = u^{\cdot}/\varepsilon$, $w^{*} = u^{*}/\varepsilon$, где $w^{\cdot}$, w^{*} — заполненность пористости водой или льдом; $u^{\cdot}$, u^{*} — объемная влажность или льдистость; ε — пористость.

Вычисление коэффициента теплопроводности сухих и увлажненных талых и мерзлых почв и обломочных пород производится с помощью выражений (3.1), (3.6) и (3.7). Сразу возникает вопрос о рекомендуемых значениях параметра λ_0.

Известна формула В. В. Ржевского и Г. Я. Новика для наиболее широко распространенных пористых горных пород (только сухих):

$$\lambda_m = 0,077\gamma^{3,1},$$

которая будучи преобразованной с учетом размерностей к виду (3.1), выглядит следующим образом:

$$\lambda_m = 0,077(\rho/\rho^*)^{3,1}(1-\varepsilon)^{3,1}.$$

Таким образом, при наиболее вероятном значении $\rho = 2650$ кг/м^3 и $m = 3,1$

$$\lambda_0 = 1,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

Даже самое грубое обобщение некоторых, в основном литературных, данных выявляет при $m = 2,5$ и $n = 0,75$ достаточно четкую закономерность изменения параметра λ_0 в зависимости от гранулометрического состава почвы (табл. 3.3).

Для вычисления коэффициента теплопроводности сухого снега в зависимости от его плотности существует достаточное количество формул, однако все они в большей или меньшей степени не удовлетворяют естественному верхнему граничному условию. В связи с этим можно воспользоваться расчетным выражением, в котором в качестве твердого вещества выступает лед:

$$\lambda_c^* = \lambda^*(1-\varepsilon_c)^m = \lambda^*[\gamma_c^*(\rho^*)^{-1}]^m, \; m = 2. \qquad (3.8)$$

Выдвинуто предположение, что на значение эффективного (кондукция плюс конвекция) коэффициента теплопроводности сильно влияет температура снега θ_c, что может быть отображено выражением $\lambda_c^*(\theta_c)(\lambda^*)^{-1} = 1 + 1,18\exp(0,15\theta_c)$.

С использованием такого уравнения согласиться трудно, ибо влияние конвекции с ростом плотности (уменьшения пористости) снега падает. Поэтому целесообразней остановиться на двухфакторном выражении вида

$$\lambda_c^*(\theta_c, \gamma_c)(\lambda_c^*)^{-1} = 1 + \exp(0,1\theta_c)(1-\gamma_c^*/\rho^*), \; \theta_c \le 0\,°\text{C}.$$

Если использовать это выражение, то в качестве основной формулы для расчета коэффициента теплопроводности логично принять выражение (3.8) при $m = 2,5$, но с добавлением небольшого постоянного члена:

$$\lambda_c^* = \{1 + \exp(0,1\theta_c)[1 - \gamma_c^*(\rho^*)^{-1}]\}\{2,2[\gamma_c^*(\rho^*)^{-1}]^{2,5} + 0,02\}.$$

Таблица 3.3. **Значения параметра λ_0**

Почвы	Песчаные	Супесчаные	Суглинистые	Глинистые	Торфяные
λ_0, Вт/(м · °С)	2,5	1,7	1,3	1,0	0,8

Таблица 3.4. **Коэффициенты теплопроводности снега, Вт/(м·°С)$^{-1}$**

Температура снега, °С	Значения λ_c, Вт/(м·°С)$^{-1}$, при плотности снега, кг/м^3, равной								
	100	200	300	400	500	600	700	800	920
0	0,05	0,12	0,26	0,46	0,73	1,05	1,40	1,78	2,22
$\rightarrow -\infty$	0,03	0,07	0,15	0,29	0,50	0,78	1,13	1,57	2,22

Предлагаемые коэффициенты теплопроводности снега при различных значениях его плотности и температуры приведены в табл. 3.4.

3.2.3. Физические и водно-физические свойства многофазной дисперсной среды

Методы определения и типичные задачи таких интегральных (статистических по своей природе) показателей, как плотность вещества, максимальная водоудерживающая способность, коэффициент фильтрации системы почва—реголит широко известны. Тем не менее всегда приходится испытывать затруднения с назначением этих характеристик, когда дело касается конкретных объектов. Поэтому обобщение этих расчетных показателей и установление соотношений между ними представляется важной задачей в методологическом и прикладном отношениях.

Думается, что если говорить о почве и реголите, то объяснение их взаимодействия с талыми и дождевыми водами уже заложено в информации об их фазовом, гранулометрическом и минералогическом составах.

Информационные векторы состава почвы-реголита

Введем понятия об основных (информационных) и вспомогательных (операционных) векторах. В дальнейшем, говоря об относительном содержании того или иного элемента, будем подразумевать исключительно доли объема.

В данном случае под термином «вектор» или «вектор—столбец» следует понимать величину

$$x = \begin{Vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{Vmatrix},$$

определяемую как набор n чисел, называемых компонентами вектора, в то время как n — его размерность.

Векторы в используемом ниже качестве должны восприниматься как несравненно более полноценные характеристики почвы и реголита по сравнению с более привычными средними величинами.

Уместно вспомнить о высказанной грунтоведами возможности определения свойств дисперсных грунтов путем установления коэффициентов пропорциональности между различными показателями этих свойств. Более естественным и методологически правильным является не установление корреляционных связей между свойствами горных пород, а их вычисление на базе информационных и операционных векторов. Другими словами, каждая характеристика системы почва—реголит не функция какой-либо другой характеристики, а функционал, определяемый соответствующей операцией с исходными функциями распределения некоторых показателей, заданных в виде последовательности чисел (векторов).

Фазовый вектор. В самом общем виде в почве-реголите следует различать три фазы: твердую, жидкую и газообразную. Поскольку вода может пребывать в жидком и твердом состоянии, то это должно быть учтено. Фазовый вектор имеет вид:

$$P = \|p(01)\,p(02)\,p(03)\,p(04)\|,$$

где $p(0i) \geq 0$; $\sum_{i=1}^{4} p(0i) = 1$; $p(01)$ — относительный объем (в долях единицы) системы почва—реголит, занимаемый воздухом; $p(02)$ и $p(03)$ — то же, соответственно для воды и льда (объемные влажность и льдистость); $p(04)$ — то же, для твердого вещества.

Очевидно соотношение: $p(01) + p(02) + p(03) = \varepsilon$, где ε — свободная пористость; $\varepsilon + p(04) = 1$.

Гранулометрический вектор. Почва-реголит представляет собой дисперсоид, сложенный частицами и обломками горной породы различного размера. Максимальный диаметр крупнейших включений может превышать размер мельчайших частиц в 10^8 раз. При такой ситуации кривая распределения размеров части или соответствующий ей гранулометрический вектор приобретают важнейшее информационное значение, которое не может быть достигнуто какими-либо средними, модальными или медианными показателями. Итак, гранулометрический вектор

$$G = \|g(1)\,g(2)\ldots g(8)\|.$$

Здесь $g(i) \geq 0$; $\sum_{i=1}^{8} g(i) = 1$; $g(i)$ — относительный объем, занимаемый частицами i-го фракционного диапазона. Границы диапазонов даны в табл. 3.5.

Таблица 3.5. **Границы гранулометрических диапазонов**

Номер диапазона	Размер частиц		Наименование
	мм	м	
1	< 0,001	$< 10^{-6}$	Коллоиды, глина
2	0,001—0,01	10^{-6}—10^{-5}	Глина
3	0,01—0,1	10^{-5}—10^{-4}	Пыль (алеврит)
4	0,1—1	10^{-4}—10^{-3}	Песок
5	1—10	10^{-3}—10^{-2}	Гравий, дресва
6	10—100	10^{-2}—10^{-1}	Галька, щебень
7	100—1 000	10^{-1}—1	Валуны, камни
8	1 000—10 000	1—10	Глыбы
9	> 10 000	> 10	Индивидуальные объекты

Объединяя гранулометрические диапазоны попарно, можно дать им следующие наименования:

1; 2 — почвенная плазма (смесь гумуса с глиной);

3; 4 — пылепесчаная фракция реголита;

5; 6 — мелкообломочная фракция реголита;

7; 8 — крупнообломочная фракция реголита.

Твердое вещество 1—4 диапазонов обычно именуют мелкоземом. Что касается индивидуальных объектов, то вряд ли их следует принимать во внимание при оценках статистических свойств системы почва-реголит.

Минералогические векторы. В первом приближении можно полагать, что физические свойства обломочной породы не очень сильно зависят от петрографического состава обломков. Однако минералогический состав фракций размером менее 0,01 мм оказывает на эти свойства огромное, в некоторых отношениях определяющее, влияние. При достаточно грубом обобщении минералогические векторы можно представить в виде

$$M_1 = \|m_1(a)\, m_1(b)\, m_1(c)\, m_1(d)\, m_1(e)\|;$$

$$M_2 = \|m_2(a)\, m_2(b)\, m_2(c)\, m_2(d)\, m_2(e)\|,$$

где $m_j(i) \geq 0$, $\sum_{i=a}^{e} m_j(i) = 1$, $m_j(i)$, $j = 1;\ 2$ — относительные объемы, занимаемые различными минералами, соответственно для

фракций 1-го и 2-го диапазонов; *a* — Na-монтмориллонит; *b* — Ca-монтмориллонит; *c* — гидрослюда (иллит); *d* — каолинит; *e* — прочие минералы.

Среди минералов, отнесенных к числу прочих, наиболее распространены кварц, кальцит, полевой шпат и слюды.

Гумусно-минеральные векторы. Для характеристики почв необходимо знать соотношение в них минерального и органического вещества. Соответствующие векторы для двух первых гранулометрических диапазонов имеют вид:

$$H_1 = \|h_1(\alpha)\, h_1(\beta)\|;$$
$$H_2 = \|h_2(\alpha)\, h_2(\beta)\|,$$

где $h_j(\alpha)$ и $h_j(\beta)$ — соответственно относительные объемы гумуса и минеральных веществ; $h_j(i) \geq 0$; $h_j(\alpha) + h_j(\beta) = 1$, $j = 1; 2$.

Простейшие операции. В принципе операции с информационными векторами дают возможность определить интересующие нас физические свойства системы почва—реголит.

Изложим некоторые правила, определяющие операции с векторами. Будем иметь в виду два вектора:

$$Q = \|q(1)\, q(2) \ldots q(n)\|;$$
$$S = \|s(1)\, s(2) \ldots s(n)\|.$$

1. Умножение вектора на постоянную величину

$$cQ = \|cq(1)\; cq(2) \ldots cq(n)\|.$$

2. Сложение двух векторов

$$Q + S = \|q(1) + s(1)\;\; q(2) + s(2) \;\ldots\; q(n) + s(n)\|.$$

3. Скалярное произведение двух векторов

$$QS = \sum_{i=1}^{n} q(i)s(i).$$

Фазово-гранулометрический вектор. Фазово-гранулометрический вектор, показательный уже сам по себе, позволяет определить многие характеристики системы почва—реголит. Он легко вычисляется при объединении фазового и гранулометрического векторов по следующему правилу:

$$f(01) = p(01); \quad f(02) = p(02); \quad f(03) = p(03);$$
$$f(i) = p(04)g(i); \;\; 8 \geq i \geq 1;$$
$$f(01) + f(02) + f(03) + \sum_{i=1}^{8} f(i) = 1.$$

В конечном счете

$$F = \|f(01)\ f(02)\ f(03)\ f(1)\ f(2)\ldots f(8)\|.$$

Плотность твердого вещества почвы и реголита и их плотность в естественном залегании. Введем понятие об операционных векторах плотности гранулометрических элементов, фазово-гранулометрических элементов, глинистых минералов и гумуса:

$$D_1 = \|\rho(1)\ \rho(2)\ldots\rho(8)\|;$$
$$D_2 = \|\rho(01)\ \rho(02)\ \rho(03)\ \rho(1)\ \rho(2)\ldots\rho(8)\|;$$
$$D_3 = \|\rho(a)\rho(b)\ \rho(c)\ \rho(d)\ \rho(e)\|;$$
$$D_{41} = \|\rho(\alpha)\rho(\beta 1)\|;$$
$$D_{42} = \|\rho(\alpha)\ \rho(\beta 2)\|.$$

Типичные осредненные значения плотности вещества в приведенных уравнениях таковы:

$$p(3) = p(4) = \ldots = p(8)\ \text{(табл. 3.1)};$$
$$p(01) = 0;\ p(02) = 1\,000;\ p(03) = 920;$$
$$p(a) = p(b) = 2\,350;\ p(c) = 2\,750;$$
$$p(d) = 2\,640;\ p(e) = 2\,600 \div 3\,000;\ p(\alpha) = 1\,300;\ \text{кг/м}^3.$$

Значения $\rho(\beta 1)$ и $\rho(\beta 2)$ определяются умножением минералогических векторов на вектор плотности минералов:

$$\rho(\beta 1) = M_1 D_3 = \sum_{i=a}^{e} \rho(i) m_1(i);$$

$$\rho(\beta 2) = M_2 D_3 = \sum_{i=a}^{e} \rho(i) m_2(i).$$

Первые два элемента операционного вектора $\mathbf{D}_1$ (они же — четвертый и пятый элементы вектора $\mathbf{D}_2$) могут быть вычислены с помощью соотношений

$$\rho(1) = H_1 D_{41} = h_1(\alpha)\rho(\alpha) + h_1(\beta)\rho(\beta 1);$$
$$\rho(2) = H_2 D_{42} = h_2(\alpha)\rho(\alpha) + h_2(\beta)\rho(\beta 2).$$

Плотность почвы-реголита в естественном залегании представляет собой скалярное произведение фазово-гранулометрического вектора $\mathbf{F}$ и вектора плотности фазово-гранулометрических элементов $\mathbf{D}_2$:

$$\gamma = FD_2 = \sum_{j=01}^{03} p(j) f(j) + \sum_{i=1}^{8} p(i) f(i).$$

Плотность твердого вещества почвы-реголита вычисляется в соответствие с аналогичным выражением

$$\rho = D_1 G = \sum_{i=1}^{8} p(i)g(i).$$

3.2.4. Вода в системе почва—реголит

Будем различать три вида состояния воды в системе почва—реголит: условно связанную (неподвижную), удерживаемую и свободную (гравитационную). Необходимо рассмотреть почвенно-гидрологические «константы» (характерные значения влажности) и их соотношение с выделенными видами состояния воды. Количество связанной влаги можно отождествить с влажностью завядания. Максимальная водоудерживающая способность почвы-реголита, определяющая совместное количество удерживаемой и условно связанной воды, хорошо отождествляется с бытующим в почвоведении понятием наименьшей влагоемкости или предельной полевой влагоемкости.

Полная влагоемкость, численно приближенно равная пористости, отвечает содержанию в почве-реголите всех трех видов воды. Очевидно, что каждая последующая категория влажности включает в себя предыдущие. При расчетах это должно быть учтено.

Далее будем иметь в виду следующие показатели, обозначения и соотношения:

1) общая пористость — ε; влажность (объемная влажность и слой) — u, h;

2) показатели влажности, соответствующие неподвижной влаге, — u_m, h_m;

3) максимальная водоудерживающая способность — $u_{\max}$, $h_{\max}$;

4) все показатели за вычетом неподвижной влаги —

$$\varepsilon' = \varepsilon - u_m;\ u' = u - u_m;\ h' = h - h_m;\ u'_{\max} = u_{\max} - u_m;\ h'_{\max} = h_{\max} - h_m;$$

5) объемная льдистость $(u')^* = \rho^* u'(\rho^*)^{-1}$;

6) заполненность (степень заполнения) пористого пространства водой $w' = u'(\varepsilon')^{-1}$ или льдом $(w')^* = (u')^*(\varepsilon')^{-1}$;

7) относительная влажность $v' = u'(u'_{\max})^{-1} = h'(h'_{\max})^{-1}$.

Количество связанной влаги. Общее количество воды, удерживаемое поверхностными силами твердого вещества почвы-реголита, определяется суммой объемов связанной воды, приходящейся на каждый фракционный диапазон. Относительный объем воды, связываемый частицами размером менее 0,001 мм, может быть определен по данным о границе текучести основных глинистых минералов (табл. 3.6). Толщина пленки воды, необходимой

для смачивания поверхности гравия, гальки и валунов, составляет 0,01 мм. Остальные необходимые величины определены интерполяцией с учетом изменения площади поверхности частиц в зависимости от их размера. Введем операционные векторы связанной влаги:

$$R_1 = \|r_1(a)\ r_1(b)\ r_1(c)\ r_1(d)\ r_1(e)\| = \|16{,}5\ \ 4{,}2\ \ 2{,}1\ \ 1{,}6\ \ 0{,}5\|;$$

$$R_2 = \|r_2(a)\ r_2(b)\ r_2(c)\ r_2(d)\ r_2(e)\| = \|2{,}5\ \ 0{,}8\ \ 0{,}5\ \ 0{,}3\ \ 0{,}1\|;$$

$$r(1) = M_1R_1 = \sum_{i=a}^{e} m_1(i)r_1(i);\quad r(2) = M_2R_2 = \sum_{i=a}^{e} m_2(i)r_2(i);$$

$$R = \|r(1)\ r(2)\ 0{,}06\ \ 0{,}02\ \ 0{,}01\ \ 0{,}002\ \ 0{,}0002\ \ 0{,}00002\|.$$

Объем связанной воды по отношению к объему твердого вещества почвы-реголита определяется скалярным произведением основного вектора связанной влаги и гранулометрического вектора:

$$r = RG = \sum_{i=1}^{8} r(i)g(i).$$

Элемент фазового вектора, соответствующий содержанию в почве-реголите только связанной влаги, определяется соотношением

$$p(02) = rp(04) = u_m.$$

Максимальная водоудерживающая способность. Максимальная водоудерживающая способность системы почва—реголит соответствует понятию наименьшей или предельной полевой влагоемкости почвоведения и в нашем контексте выражается в долях от общего объема (или толщины слоя) системы. Этот показатель играет очень важную роль в наземной ветви гидрологического цикла.

Введем понятие об операционных векторах задерживаемой влаги:

$$\mathbf{N}_1 = \|n_1(a)\ n_1(b)\ n_1(c)\ n_1(d)\ n_1(e)\| = \|25{,}0\ \ 6{,}3\ \ 3{,}2\ \ 2{,}4\ \ 0{,}8\|;$$

$$\mathbf{N}_2 = \|n_2(a)\ n_2(b)\ n_2(c)\ n_2(d)\ n_2(e)\| = \|3{,}8\ \ 1{,}2\ \ 0{,}8\ \ 0{,}5\ \ 0{,}2\|;$$

$$n(1) = M_1N_1 = \sum_{i=a}^{e} m_1(i)n_1(i);$$

$$n(2) = M_2N_2 = \sum_{i=a}^{e} m_2(i)n_2(i);$$

Таблица 3.6. **Относительный объем влаги, связываемой глинистыми минералами**

Глинистые минералы	$R(i)$
Na-монтмориллонит	16,5
Ca-монтмориллонит	4,2
Гидрослюда (иллит)	2,1
Каолинит	1,6
Неглинистые	0,5

Примечание. Здесь $R(i)$ — безразмерное отношение объема связанной воды к объему твердых частиц.

$$\mathbf{N} = \|n(1)\ n(2)\ \ 0{,}10\ \ 0{,}03\ \ 0{,}02\ \ 0{,}003\ \ 0{,}0003\ \ 0{,}00003\|.$$

Числа в записи вектора $\mathbf{N}_1$ соответствуют данным табл. 3.6, увеличенным в 1,5 раза.

Объем задерживаемой воды по отношению к объему твердого вещества почвы-реголита определяется скалярным произведением основного вектора задерживаемой влаги и гранулометрического вектора:

$$n = NG = \sum_{i=1}^{8} n(i)g(i).$$

Элемент фазового вектора, соответствующий содержанию в почве-реголите задерживаемой влаги, определяется соотношением

$$p(02) = n; \quad p(04) = u_{\text{м}}.$$

Коэффициент фильтрации. Рассмотренные подходы определения характеристик системы почва—реголит на базе операций с ее информационными и операционными векторами носят более методологический, чем практический характер. В особой мере это относится к такому показателю как коэффициент фильтрации.

Коэффициент фильтрации как мера водопроницаемости системы почва—реголит представляется важнейшим показателем почвенной гидрологии. Он определяется степенью дисперсности системы и может быть связан с ее пористостью и удельной поверхностью.

Введем операционный вектор удельной поверхности почвенного тела:

$$\mathbf{S} = \|s(1)\ s(2)\ldots s(8)\| = 3{,}3\|10^7\ \ 10^6\ \ 10^5\ \ 10^4\ \ 10^3\ \ 10^2\ \ 10\ \ 1\|.$$

При определении вектора $\mathbf{S}$ использована гипотеза о равномерности распределения частиц по размерам в пределах каждого гранулометрического диапазона и известное соотношение $\omega = 6/l$, где ω — удельная поверхность [м$^{-1}$]; l — линейный размер частиц (для кубических — сторона куба, для сферических — диаметр шара). Удельные поверхности для соседних граничных значений принятых гранулометрических диапазонов соотносятся как 0,6 и 6, что дает в среднем 3,3.

Общая удельная поверхность системы почва—реголит определится скалярным произведением векторов удельной поверхности и гранулометрического:

$$\omega' = SG = \sum_{i=1}^{8} s(i)g(i).$$

Возможно, логичнее иметь дело с величиной

$$\omega = (1 - \varepsilon)\,\omega'.$$

Коэффициент фильтрации теперь может быть вычислен с помощью известного соотношения, полученного на основании формулы Пуазейля для модельной системы параллельных вертикальных капилляров:

$$f_0 = \rho' g \varepsilon^3 / (2\mu\omega^2),$$

где μ — коэффициент динамической вязкости, Па · с.

Можно иметь в виду более общее выражение

$$f_0 = A\varepsilon^3/\omega^2,$$

где A может быть определено экспериментально. До конца не ясно, следует ли практически учитывать зависимость μ от температуры, что, например, приводит к увеличению A при изменении температуры воды от 0 до 25 °С в два раза.

Возможны и несколько иные подходы к определению коэффициента фильтрации с помощью информационных и операционных векторов. Видимо, между значениями коэффициента фильтрации и максимальной водоудерживающей способностью, зависящих почти от одних и тех же факторов, в том числе от удельной поверхности, существует более тесная зависимость, чем это до сих пор предполагалось. Об этом, в частности, свидетельствует и выражение С. А. Лаврова:

$$f_0 = k(\varepsilon - u_{\max} - 0{,}04)^2 / u_{\max},$$

где $k = 3{,}63 \cdot 10^{-5}$ м/с = 2,18 мм/мин; 0,04 — принятая доля защемленного воздуха.

Максимальная водоудерживающая способность и коэффициент фильтрации мерзлой почвы. Известно, что свободная вода в почвереголите имеет температуру замерзания 0 °С, в то время как связанная вода характеризуется широким спектром температуры замерзания в зависимости от степени своей связанности. Более сложные модели промерзания и оттаивания пористой среды должны использовать кривые содержания незамерзшей влаги от температуры. Желание не усложнять модель и затруднения с соответствующим информационным обеспечением приводят к необходимости принять следующее условие: какие-либо затраты энергии на фазовые переходы связанной воды не рассматриваются и во внимание не принимаются. Связанную, неподвижную, незамерзающую (при 0 °С) влагу будем считать постоянным спутником почвенного вещества и только.

Каких-либо сведений об экспериментальных оценках максимальной водоудерживающей способности мерзлых почв практически нет. Поэтому для вычисления этой характеристики постро-

им простейшее интерполяционное выражение, полученное в предположении, что доля свободных от льда пор, занятых удерживаемой водой, постоянна:

$$(u'_{\max})^* = u'_{\max}[1-(w')^*].$$

Тогда слой воды в слое мерзлой почвы, соответствующий максимальной водоудерживающей способности, определится соотношением

$$(h'_{\max})^* = (u'_{\max})^* \varepsilon' \Delta x = h'_{\max}[1-(h')^* \rho^* (\varepsilon' \Delta x \rho^*)^{-1}],$$

где Δx — толщина слоя мерзлой почвы; $(h')^*$ — слой «твердой» воды (водный эквивалент слоя льда) в слое почвы.

Коэффициент фильтрации мерзлой почвы естественно считать функцией ее льдистости. Положим в основу наших рассуждений зависимость Лейбензона — Аверьянова — Будаговского (зависимость коэффициента влагопроводности от влагонасыщенности)

$$f_w/f_0 = w^n,$$

где $n = 4$; w — степень заполнения свободных пор водой или насыщенность по Л. С. Лейбензону и А. И. Будаговскому.

Коэффициент фильтрации талой почвы отвечает этому уравнению при $w' = 1$. Если часть пор занята льдом, то при полном насыщении оставшихся свободными пор $w' = 1-(w')^*$ и

$$f_0^*/f_0 = [1-(w')^*]^n. \qquad (3.9)$$

Эмпирическая оценка показателя степени n в уравнении (3.9) в некотором смысле очень непроста. Пространство между частицами почвы-реголита представляет собой сложнейшую систему пор различного размера. Последние описываются соответствующей кривой распределения, предположительно логарифмически-нормальной. Качественно можно говорить о микро-, мезо- и макропорах. Теперь представим себе, что льдом заполнена определенная часть порового пространства $(w')^*$. Сделать это можно по-разному: полностью заполнить мелкие или, наоборот, наиболее крупные поры, или, оставив те и другие свободными, занять какие-то промежуточного размера, или же зацементировать льдом одинаковую долю всех пор, или не одинаковую... Если лед заполняет микропоры, то этот факт слабо скажется на значении коэффициента фильтрации, если же он выведет из строя макропоры, то последний значительно уменьшится. Можно высказать предположение, что многое зависит от самого процесса образования льдистости. Возможны два крайних варианта: 1) замерзает влага, до этого находящаяся в талой почве; 2) замерзает вода, медленно просачивающаяся в почву, обладающую большим запасом холода.

Таблица 3.7. **Значения показателя степени *n* в уравнении (3.9) в зависимости от вариантов формирования льдистости в почве**

Тип почвы	Варианты формирования льдистости		
	1	2	Средний
Песчаная	3	5	4
Супесчаная	4	6	5
Суглинистая	5	7	6
Глинистая	6	8	7

Изложенные соображения достаточно умозрительны. Однако немногие экспериментальные данные действительно подтверждают эффект влияния предыстории формирования льдистости. Дополнительное влияние оказывает механический состав почвы и рыхлообломочной горной породы. В табл. 3.7 представлены значения показателя n в зависимости от типа почвы и варианта формирования льдистости. Остается обсудить последний вопрос — как различать ситуации вступления в силу первого или второго вариантов и как поступать в случае их смешения? Единственное, что пока можно рекомендовать, — это усреднить оба варианта.

3.2.5. Максимальная водоудерживающая способность снежного покрова

Водонасыщенность снежного покрова удобно характеризовать показателем

$$\beta = h_c^{\cdot}(h_c^*)^{-1} = u_c^{\cdot}\rho^{\cdot}(\gamma_c^*)^{-1}, \qquad (3.10)$$

где h_c^*, $h_c^{\cdot}$ — слои твердой и жидкой воды в снеге; $u_c^{\cdot}$ — объемная влажность снега; γ_c^* — плотность твердой фазы снега.

Тогда максимальная водоудерживающая способность снега, зависящая от его плотности, может быть выражена следующим соотношением [6]:

$$\beta_{max} = 0{,}163[\rho^*(\gamma_c^*)^{-1} - 1]. \qquad (3.11)$$

Известны и другие выражения, в которых водоудерживающая способность снега оценивается другим показателем $\delta = \beta(\beta+1)^{-1} = h_c^{\cdot}(h_c^{\cdot} + h_c^*)^{-1}$:

$$\delta_{max} = \exp[(-4\gamma_c^*(\rho^{\cdot})^{-1}] - 0{,}04 \text{ (А. П. Жидиков, Н. С. Нечаева);} \qquad (3.12)$$

$$\delta_{max} = 0{,}11[\rho^{\cdot}(\gamma_c^*)^{-1} - 1] \qquad \text{(А. Г. Ковзель).} \qquad (3.13)$$

Таблица 3.8. **Величины β_{max}, соответствующие различным значениям плотности снега γ_c^***

Уравнение	Значения β_{max} при γ_c^*, кг/м³, равной											
	$\to 0$	10	50	100	200	300	400	500	600	700	800	920
(3.11)	$\to \infty$	14,8	2,84	1,34	0,59	0,34	0,21	0,14	0,09	0,05	0,02	0
(3.12)	24,0	11,6	3,52	1,71	0,69	0,35	0,19	0,11	0,05	0,02	0,00	–0,01
(3.13)	$\to -1$	–1,1	–1,92	99,0	0,79	0,35	0,20	0,12	0,08	0,05	0,03	0,01
(3.14)	$\to 0$	0,03	0,22	0,39	0,45	0,35	0,23	0,14	0,08	0,04	0,02	0,01

Выражения (3.11)—(3.13) обладают серьезным недостатком, который, например, приводил к некоторой неадекватности при пользовании ими. Дело в том, что рост максимальной водоудерживающей способности с уменьшением плотности снега принимался неограниченным, что, конечно, не верно, ибо при $\gamma_c^* \to 0$ $\beta_{max} \to 0$. При малой плотности снег просто физически не в состоянии удерживать такое большое количество «жидкой» воды, которое предполагается при использовании уравнений (3.11)—(3.13). Поэтому более правильным представляется применение уравнения

$$\beta_{max} = 20[\gamma_c^*(\rho^*)^{-1}]^{1,4} \exp[-7,6\,\gamma_c^*(\rho^*)^{-1}], \qquad (3.14)$$

которое уже не обладает указанным недостатком, хотя экспериментально подтверждено недостаточно в области $\gamma_c^* < 250$ кг/м³.

Результаты расчета по всем четырем соотношениям проиллюстрированы в табл. 3.8, где представлены значения β_{max} при разных уровнях плотности снежного покрова.

3.3. Процессы и явления на поверхности водосбора

3.3.1. Выпадение осадков

Момент соприкосновения снежинок или дождевых капель с земной поверхностью представляет собой начало целой системы процессов наземной части гидрологического цикла. При этом важно знать — выпадает снег или дождь. Желательно по возможности формализовать и упростить эту оценку. В этом случае разделение выпадающих осадков на жидкие и твердые обычно производится по подходящей критической температуре воздуха (температурному порогу), которую можно определить как соответствующую ситуа-

ции, когда появление капель воды и снежных хлопьев равновероятно. Часто за такую критическую температуру принимают +2 °С.

Сведения о водном эквиваленте снега, получаемые с помощью осадкомеров на метеорологических станциях, не очень достоверны. Поэтому обязательным является внесение поправок к измеренным твердым осадкам. «Недомер» падающего снега остается реальностью, с которой должны считаться все те гидрологи, которые в суммах осадков видят не индексы увлажнения, пригодные только в регрессионных моделях, а элементы водного баланса. Один из самых ярких примеров такого недоучета дают наблюдения на высокогорной метеорологической станции Анзобский перевал (3 349 м) в Таджикистане, где измеряется не более $^1/_3$ истинной нормы.

Важное гидрологическое значение имеет интенсивность выпадения осадков. Особо исключительна ее роль в процессах формирования поверхностного стока (интенсивность ливней) и возникновения снежных лавин (интенсивность снегопадов). Данные наблюдений об интенсивности осадков всегда дефицитны и редко полноценны. Эта неполноценность лишь слабо компенсируется сведениями о продолжительности выпадения осадков, которая вместе со слоем может характеризовать среднюю интенсивность за отдельные дожди и снегопады. Такое положение вещей вносит некоторую неопределенность в информацию об осадках. Это постоянно следует учитывать при решении практических задач гидрологии.

3.3.2. Обмен тепловой энергией поверхности бассейна с атмосферой и космическим пространством

Земная поверхность получает тепловую энергию в основном непосредственно от Солнца и в результате турбулентного теплообмена с атмосферой. Тепловая энергия, влияя на физическое и, в частности, фазовое состояние воды, тем самым определяет многие особенности протекания наземной части гидрологического цикла. Исчерпывающе ситуацию отражает уравнение теплового баланса. Однако далеко не все метеорологические станции могут предоставить всю необходимую для этого информацию. Во многих практических случаях очень хорошим показателем энергетического воздействия со стороны Солнца и атмосферы является эффективная температура:

$$\eta_{эф} = \eta + \varepsilon S,$$

где η — обычная температура; ε — эмпирический коэффициент, подбираемый из условия минимизации расхождений расчетных и наблюденных переменных на выходе из моделей, на входе кото-

рых фигурирует $\eta_{эф}$; S — приход прямой солнечной радиации с поправками на альбедо, орографическую затененность, облачность и другие местные условия. Величина S всегда может быть рассчитана на каждый день и час в зависимости от широты, высоты над уровнем моря, ориентации и угла наклона площадки с внесением всех необходимых поправок.

3.3.3. Перехват осадков растительным покровом

Когда после ненастья проглянет солнце, никого не оставляет равнодушным игра света в мириадах капелек воды в переплетении ветвей, на листве, хвое, траве. Но это — не только красота, это — мощный механизм рассеивания влаги обратно в атмосферу, своего рода испарительная вспышка.

Перехват осадков растительным покровом — важный гидрометеорологический процесс, обычно недооцениваемый.

Незначительные дожди почти целиком задерживаются растительностью. При увеличении слоя осадков увеличивается и относительная площадь смоченной поверхности фитомассы, и количество дождевой воды, достигшей поверхности почвы. При очень больших осадках практически вся поверхность, которая в принципе может быть смочена, оказывается таковой, и перехват осадков приближается к максимальной водоудерживающей способности данного растительного сообщества. При предположении, что приращение смоченной части удельной поверхности фитомассы, отвечающее приращению слоя осадков, убывает пропорционально этой поверхности, получено выражение

$$P = (P_{max} - H_v)[1 - \exp(-H/P_{max})],$$

где P_{max} — емкость перехвата (максимальная водоудерживающая способность растительного покрова); H_v — слой воды в емкости перехвата; H — слой осадков.

Параметр P_{max} подлежит систематизации на основе выделения ландшафтов в пределах каждой природной зоны.

3.3.4. Формирование снежного покрова

Снежный покров приносит гидрологу много хлопот, так как он способен возникать и исчезать, менять толщину и плотность. И еще одно гидрометеорологическое несчастье — измерение твердых осадков несовершенно, сопровождается неопределенными погрешностями и ведется на недопустимо редкой сети пунктов, особенно в горах.

Снежный покров образуется в результате аккумуляции твердых осадков при последовательном их суммировании за отдельные снегопады. Поэтому режим накопления снега полностью соответствует режиму его выпадения, по крайней мере, в период постоянной отрицательной температуры воздуха. Оттепели нарушают эту закономерность, приводя иногда к отрицательному значению производной кривой изменения мощности снежного покрова во времени.

Особую роль в пространственном перераспределении снега играет метелевый перенос, приводящий к разной степени неравномерности снежного покрова в зависимости от характера мезо- и микрорельефа и типа ландшафта.

Помимо запаса воды в снежном покрове важнейшим его свойством является плотность твердой фазы. Плотность свежевыпавшего снега в первую очередь определяется температурой воздуха и ветровыми условиями. Метелевый перенос оказывает сильное уплотняющее влияние на формирующийся снежный покров.

Уплотнение снега с течением времени под влиянием собственной тяжести за короткие промежутки времени большого значения не имеет, однако за зимние месяцы, особенно в районах с обильными снегопадами, этот эффект проявляется заметно. Известен также факт о более быстром проседании мокрого снега по сравнению с сухим. Процесс замерзания воды, содержащейся в снеге, вносит свои коррективы в увеличение плотности твердой фазы снежного покрова.

С плотностью снега напрямую связаны такие его теплофизические свойства, как теплоемкость и теплопроводность.

Испарение с поверхности снежного покрова относительно невелико, в среднем 0,1—0,3 мм/сут, но как фактор, влияющий на формирование снежного покрова, всегда должно быть учтено.

3.3.5. Снеготаяние и разрушение снежного покрова

Весенний поток тепла со стороны атмосферы почти полностью расходуется в снежной толще на нагревание и снеготаяние. Последнее не наступает до тех пор, пока температура снега не достигнет 0 °С. На самом деле таяние может начаться и раньше, но появившаяся в верхних слоях снежного покрова талая вода просачивается вниз и вновь замерзает с выделением тепла, в результате чего происходит перекристаллизация снега и выравнивание профиля температуры вплоть до полной изотермичности при $\theta_c = 0$ °С. После этого начинается настоящее снеготаяние.

Количество снега, растаявшего в течение суток, определяется теплобалансовым соотношением, но проще всего его полагать пропорциональным средней суточной положительной температуре воз-

духа. Это единственная наблюдаемая метеорологическая величина, информация о которой всегда является наиболее полной. Такой способ определения суточного стаивания предельно прост и достаточно надежен. Однако отношение к нему очень неоднозначно и чаще всего связано с возможностями гидрологов побороть искушение принять коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом стаивания, постоянным. Это обычно и делается, но тревогу сразу вызывает его неустойчивость во времени. Обычно объясняющее эту неустойчивость воздействие разного рода факторов в основном связано с неучтенным влиянием солнечной радиации, имеющей четко выраженный годовой ход. Если же вместо температуры воздуха использовать эффективную температуру и ввести зависимость коэффициента стаивания от плотности снега

$$\zeta = \zeta^* \gamma_c^* / \rho^*,$$

где ζ^* — коэффициент стаивания льда, мм/(°С · сут); $\rho^* = 920$ кг/м^3, то коэффициент стаивания уже уверенно можно принять в качестве условной константы.

На процесс снеготаяния оказывают также влияние тепло, приносимое дождями, и тепловой поток из почвенно-грунтовой толщи. Последний не очень велик, но действие его продолжительно, а потому гидрологически значимо. Ситуация меняется, когда снежный покров залегает на вечной мерзлоте.

В результате снеготаяния мощность снежного покрова стремительно уменьшается. В конце концов остаются лишь пятна снега («пестрый» ландшафт), а затем исчезают и они.

3.3.6. Водоотдача из снега

Во время таяния жидкая вода просачивается в толщу снежного покрова. Хорошим показателем водонасыщенности снега является отношение слоев «жидкой» и «твердой» воды β. Снежному покрову, так же как и почвенному, присуща некоторая максимальная водоудерживающая способность β_{max}. Последняя имеет место в результате насыщения снежной толщи водой и последующего стекания всех ее излишков. Значение β_{max} убывает по мере перекристаллизации снега, укрупнения ледяных зерен и увеличения плотности снежного покрова, что и отражает приведенное выше уравнение (3.14).

Сравнивая текущее значение β с его критическим значением β_{max}, можно судить о готовности снега к водоотдаче, т. е. процессу вытекания воды из снежного покрова на поверхность земли.

3.3.7. Инфильтрация и формирование поверхностного стока

Поверхностным путем стекают дождевые и талые воды, не успевающие проникнуть в почвенную толщу. Соотношение впитавшейся и стекающей воды определяется, кроме характера дождя, в основном инфильтрационной способностью почв и горных пород на поверхности водосбора. Повторяемость и вообще практическая возможность возникновения поверхностного стока зависит от соотношения интенсивностей осадков и инфильтрации.

В гидрологической литературе часто можно встретить указания на то, что наиболее правильным при расчетах поверхностного стока является использование кривых инфильтрации. Эта ошибочная предпосылка привела к сомнениям в перспективности «инфильтрационного метода». Названные кривые отображают изменение во времени интенсивности напорной инфильтрации, аппроксимируемое разного рода эмпирическими и теоретическими уравнениями, например такого типа:

$$t = [h(\theta) + h](\varepsilon - \theta)\{1/(f_t - f_0) - (1/f_0)\ln[f_0/(f_t - f_0) + 1]\},$$

где $h(\theta)$ — капиллярный напор (линейная функция влажности почвы); h — толщина слоя воды на поверхности почвы; ε — пористость; θ — начальная влажность; f_t — интенсивность инфильтрации в момент времени t; f_0 — коэффициент фильтрации.

Картина инфильтрации, описываемая этим уравнением, происходит так: колонка воды, ограниченная снизу фронтом впитывания, опускается в почвенной среде, постепенно увеличивая свою высоту. У фронта впитывания на продвижении этого водного тела кроме силы тяжести постоянно действуют силы, отображаемые величиной $h(\theta)$.

Когда и где происходит напорная инфильтрация? Только при сплошном затоплении почвы. Но там, где в природе это действительно значимо, например в лужах или на залитых водой поймах рек, явление длится настолько долго по сравнению со временем убывания кривой инфильтрации до значений, близких к f_0, что проще отказаться от сложных расчетов и пользоваться просто коэффициентом фильтрации.

Схема процесса ливневой инфильтрации представляется следующим образом. В начале дождя сухая почва жадно впитывает влагу, сток полностью отсутствует. В этой стадии происходит насыщение поверхностного слоя почвы. Количество поглощенной воды в основном зависит от предшествующего увлажнения последнего.

После выпадения слоя осадков, численно равного слою начальных потерь стока H_0, начинается следующая стадия процесса инфильтрации, когда инфильтрационную способность почвы

можно считать постоянной и равной f_0, а интенсивность впитывания — зависящей только от интенсивности дождя.

Естественно, что выделение двух стадий инфильтрации, между которыми проведена резкая граница, является не более чем схематизацией.

Во время дождя на элементарную площадку случайно и независимо друг от друга падают дождевые капли. Соприкасаясь с поверхностью почвы, капли растекаются, создавая микроочаги инфильтрации и стокообразования. С течением времени эти микроочаги самым случайным и беспорядочным образом появляются и исчезают в различных частях элементарной площадки. Количество и объем дождевых капель, выпадающих на единицу поверхности в единицу времени, определяются интенсивностью дождя. Следовательно, последняя и является тем решающим аргументом, который наряду с максимально возможной интенсивностью инфильтрации в конечном счете определяет относительный размер площади инфильтрации.

При слабых моросящих дождях средняя на склоне интенсивность инфильтрации численно равна интенсивности осадков. По мере возрастания интенсивности дождя относительная площадь микроочагов инфильтрации и стокообразования увеличивается, одновременно возрастает вероятность стекания части дождевой воды за пределы элементарной площадки. При очень сильных ливнях вероятность того факта, что вся площадь одновременно покрыта водой, приближается к единице. В этом случае средняя интенсивность инфильтрации на склоне будет стремиться к f_0. Вообще же с ростом интенсивности дождя вероятность приращения стокообразующей и инфильтрующей площади постепенно уменьшается в пределе при $i \to \infty$, стремясь к нулю. Другими словами функция $\varphi(i)$ является убывающей. Если предположить, что приращение инфильтрующей площади, отвечающее приращению интенсивности дождя, убывает пропорционально этой площади, то получается, что интенсивность поверхностного стока после вычитания слоя осадков, численно равного слою начальных потерь H_0, определяется выражением

$$q = i - f = i - f_0 \left[1 - \exp(-i/f_0)\right]. \qquad (3.15)$$

Все сказанное позволяет теперь обратить внимание на ошибочность положения, бытующего в гидрологии чуть ли не в качестве фундаментального, о том, что дождь приводит к затоплению поверхности почвы тогда и только тогда, когда интенсивность дождя превосходит гидравлическую проводимость насыщенной почвы. На самом деле поверхностный сток может формироваться и в случае, когда интенсивность дождя ниже коэффициента фильтрации (гидравлической проводимости насыщенной почвы).

Уравнение (3.15) позволяет рассчитать ход поверхностного стокообразования по конкретной плювиограмме. Полезно получить выражение для расчета слоя поверхностного стока за весь период выпадения дождя за вычетом слоя начальных потерь. С этой целью обратимся к возможности преобразования случайного процесса интенсивности дождя $i\{t\}$ в таковой интенсивности поверхностного стокообразования $q\{t\}$.

Случайная функция (или процесс) — это такая функция, значение которой при любом значении аргумента (в данном случае времени t) есть случайная величина. Для удобства будем рассматривать некий случайный процесс $i^*\{t\} = i\{t\}/I$, где $I = (1/T)\int_0^T i\{t\}dt$ есть средняя интенсивность дождя за время его выпадения T. Дело в том, что случайный процесс $i^*\{t\}$ приобрел так называемое *эргодическое свойство*, при котором каждая его реализация является полноценным элементом единого стационарного процесса с математическим ожиданием, равным единице. Известно, что закон распределения $i\{t\}$ является показательным

$$\varphi(i) = (1/I)\exp(-i/I);\ \ \varphi(i^*) = \exp(-i^*).$$

Ниже верхний индекс * при любом аргументе указывает на то, что последний поделен на I.

Учитывая физическое уравнение (3.15), найдем математическое ожидание (среднее значение) случайного процесса разности интенсивности дождя и инфильтрации

$$M(q^*) = \int_0^\infty \{i^* - f_0^*[1 - \exp(-i^*/f_0^*)]\}\varphi(i^*)di^* = 1/(f_0^* + 1).$$

В конечном счете $M(q) = I^2/(I+f_0)$.

Тогда значение слоя поверхностного стокообразования за время T будет:

$$H_q = H^2/(H + f_0 T).$$

3.3.8. Поверхностное задержание

Слой поверхностного задержания — часть слоя поверхностного стока, расходуемая на заполнение отрицательных форм микрорельефа поверхности водосбора. Потенциальные возможности задержать определенную часть поверхностного стока обусловлены свободной емкостью поверхностного задержания, т. е. разностью между максимально возможной емкостью D_{max} и количеством воды в лужах к моменту начала стока D_0. Тогда слой поверхностного

задержания D за время формирования слоя поверхностного стока H_q может определяться выражением

$$D = (D_{max} - D_0)[1 - \exp(-H_q / D_{max})].$$

3.4. Процессы и явления в почве и приповерхностном слое земной коры

3.4.1. Динамика тепловой энергии

Температурный режим почвы и реголита имеет прямые гидрологические последствия в случаях, когда температура в определенное время года опускается ниже 0 °С. Следовательно, для экваториального и тропического поясов Земли тепловые процессы в почве гидрологически почти незначимы. Зато в тундре, полярных пустынях и высокогорье они являются определяющими.

Если выделенную для рассмотрения почвенную толщу идеализировать, то задача описания динамики тепловой энергии в ней решается с помощью простого уравнения с частными производными — уравнения теплопроводности:

$$\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = c \frac{\partial \theta}{\partial t}, \qquad (3.16)$$

где θ — температура почвы, °С; z — расстояние по глубине, м; t — время, с; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С); c — объемная теплоемкость почвы, Дж/(м^3 · °С).

Граничное условие на поверхности почвы соответствует теплообмену с атмосферой, обычная или эффективная температура которой известна. На нижней границе рассматриваемой почвенной толщи обычно принимается или какая-то постоянная температура, или заданный температурный ход во времени. В действительности ситуация сильно осложнена. Причин для этого достаточно много. Коэффициенты c и λ не являются постоянными, а зависят от влажности почвы и фазового состояния почвенных вод. Должен быть учтен теплоэнергетический вклад выпадающих дождей. Фазовые переходы в почве прерывают закономерность, описываемую уравнением (3.16), так как в этом случае там, где вода замерзает или лед тает, температура остается постоянной и равной 0 °С. Существуют разные подходы к преодолению названных осложнений.

В самом общем случае приходится рассматривать многослойную среду, своего рода торт «наполеон», состоящую из талых и мерзлых прослоек. Границы раздела фаз в зависимости от теплового режима среды могут перемещаться, временами сливаясь друг

с другом, что свидетельствует об исчезновении того или иного протаявшего или промерзшего слоя. Число границ может и увеличиться, что отвечает возникновению новых прослоек. Такая ситуация описывается системой уравнений теплопроводности, количество которых не постоянно. Система должна быть дополнена условием фазовых переходов на границах прослоек (условие Стефана).

Возможно несколько иное математическое описание данной задачи. Разница заключается лишь в том, что если в первом случае переменный пространственный шаг определяет расстояние между переломными точками профиля температуры, то во втором — этот шаг является постоянным интервалом осреднения и вместо непрерывной кривой имеет место ступенчатая гистограмма распределения температуры почвы по глубине.

Как и все физические характеристики выделенных слоев почвы, температура принимается постоянной в пределах слоя и скачкообразно изменяется на границах слоев. В этом случае динамика тепловой энергии описывается системой дифференциальных уравнений типа

$$dU_i/dt = \xi_{i-1,i}(\theta_{i-1} - \theta_i) - \xi_{i,i+1}(\theta_i - \theta_{i+1}),$$

где U_i — количество тепловой энергии, содержащейся в i-м слое почвы на единичной площади, Дж/м^2.

Коэффициент теплообмена между двумя слоями почвы, Вт/(м$^2 \cdot$ °С), связан с их коэффициентами теплопроводности и определяется соотношением

$$\xi_{12} = 2/(\Delta Z_1/\lambda_1 + \Delta Z_2/\lambda_2),$$

где ΔZ — толщина выделенного слоя почвы, м.

Общая картина динамики тепла и холода в почве (обычно приходится рассматривать почвенные слои вместе со снежным покровом) изложена ниже.

В морозный период после снижения температуры верхнего слоя почвы до 0 °С холод продолжает поступать в него, не изменяя его температуру до тех пор, пока не будет компенсировано выделение тепловой энергии, численно равной удельной теплоте замерзания воды, находящейся в слое, после чего воздействие холода вновь сопровождается понижением температуры почвы.

Весной поток тепла из атмосферы в верхний почвенный слой не поступает, так как полностью расходуется в снежной толще на снеготаяние. Однако при этом может передаваться из почвы часть запасенного за зиму холода в снежный покров.

После схода снега и повышения температуры почвы до 0 °С тепло продолжает поступать в верхний слой почвы, не изменяя его температуру до тех пор, пока не будет израсходована энергия,

необходимая для таяния льда, содержащегося в этом слое, после чего приход тепла сопровождается дальнейшим повышением температуры. Аналогично дело обстоит с поступлением тепла и изменением температуры нижележащих почвенных слоев.

3.4.2. Динамика почвенных вод

Динамика влаги в почве и реголите как во время поступления воды, так и в период ее расходования — одна из важнейших проблем почвенной гидрологии. При решении задачи оценки одномерного вертикального перемещения почвенных вод стало обычным обращение к очень популярному так называемому уравнению влагопроводности или диффузии почвенной влаги:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D\frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z}, \qquad (3.17)$$

где w — объемная влажность почвы; K — коэффициент влагопроводности, мм/мин; t — время, мин; D — коэффициент диффузии почвенной влаги, мм^2/ мин.

Однако главное, мир уравнения диффузии и природа пребывания воды в почве имеют между собой мало общего.

Более подробно эта проблема обсуждена ниже в подразд. 7.4, посвященном математическому моделированию в гидрологии. Оказалось, что уравнение (3.17) противоречит многим эмпирическим фактам и, тем самым, может трактоваться как неадекватное природе динамики почвенных вод. Таким образом, уравнение диффузии почвенной влаги неизбежно должно нас беспокоить.

Данный пример является показательным с точки зрения чисто внешнего сходства таких принципиально различных физических явлений, как теплопроводность и диффузия химических веществ в воде и почве, с одной стороны, и «диффузия» почвенной влаги, с другой, но по сути дела имеющих совершенно различную природу.

Не обращая внимания на достоинства и недостатки уравнения диффузии влаги, на него можно посмотреть и с другой стороны.

Многие расчетные эффекты типа быстрого изменения процесса влагопроводности при параллельном стремительном изменении коэффициентов D и K завершаются за считанные минуты, а гидрологически важный итог — изменение запасов воды в почвенных слоях, почвенный сток и питание подземных вод — обычно оценивается за сутки или доли суток. И уже не имеет значения, какие колебания процесса нисходящего движения воды связаны с погашением капиллярных и сорбционных сил, отображаемых

коэффициентом D, и за какое время, которое во всех случаях составляет относительно малую долю любого реального расчетного интервала времени. Возникает ситуация, когда плата за не очень-то ясные свойства уравнения (3.17) оказывается чрезвычайно высокой. Обеспечение информацией о $D(w)$- и $K(w)$-функциях является самой сложной и почти безнадежной задачей среди всех гидрофизических показателей. Поэтому широко распространился способ выражения этих функций через обычные почвенно-гидрологические «константы». Тем самым круг замкнулся и возникает вопрос — нельзя ли освободиться от магического воздействия уравнения диффузии почвенной влаги и решать задачу, пользуясь обычными водно-балансовыми соотношениями и названными «константами»? Схема, которую при этом следует постоянно иметь в виду, очень проста и изложена ниже.

Водоотдача из каждого почвенного слоя отсутствует до тех пор, пока его влагосодержание не станет соответствовать максимальной водоудерживающей способности. Как только этот уровень достигнут, вся дополнительная вода полностью покидает почвенный слой. Если низкая инфильтрационная способность (коэффициент фильтрации) хотя бы одного из почвенных слоев наложит ограничение на свободное просачивание воды, то формируется почвенный сток. В частности, это происходит при неглубоком расположении абсолютного или относительного водоупоров или протаивании промерзшей сцементированной льдом почвы. Вертикальный поток почвенных вод, покидающий почвенную толщу, идет на пополнение грунтовых вод.

3.4.3. Испарение

Испарение — один из важнейших процессов наземной части гидрологического цикла. Оно, наряду с выпадением осадков, в конечном счете определяет климатические условия формирования стока. В основе понимания роли испарения лежит уравнение водного баланса, элементы которого — осадки, сток и испарение — осреднены за многолетний период:

$$X = Y + Z. \tag{3.18}$$

Самым парадоксальным в практике применения этого уравнения является то, что функция (сток), зависящая от аргументов (осадки и испарение), — единственный элемент уравнения (3.18), определяемый с приемлемой точностью. Ошибки в оценке осадков (а это непростая проблема) немедленно требуют компенсации и в оценке испарения.

Поскольку затраты тепла на испарение — физически вполне определенная величина (для превращения 1 м^3 воды в пар необ-

ходимо затратить $248 \cdot 10^7$ Дж тепловой энергии), уравнение теплового баланса также может быть использовано для вычисления испарения. Однако и здесь таится досадная неопределенность, так как все ошибки элементов этого уравнения немедленно сказываются на оценке испарения. Это так называемый «*эффект остаточного члена*» уравнения любого закона сохранения.

В обломочных отложениях, например в осыпях, испарение воды происходит в местах ее скопления. В почвах вода передвигается в основном в жидком виде к испаряющей поверхности. Испарение происходит в верхнем слое почвы, который в результате охлаждается. Корневая система растительного покрова, пронизывающая почвенную толщу, всасывает влагу, расходуя более 90 % ее на транспирацию. Потери тепла на последнюю происходят на поверхности листвы и в травах.

Испарение с поверхности почвенно-растительного покрова равно сумме потерь воды во всех слоях почвы. С ростом интенсивности и продолжительности испарения повышается вклад все более низкорасположенных почвенных горизонтов. Последние включаются в процесс испарения лишь тогда, когда хотя бы немного подсохнут верхние слои почвы. Для каждого типа и состояния почвы или реголита существует убывающая по глубине последовательность вкладов каждого слоя почвы в общее испарение при прочих равных условиях.

Испарение лимитируется степенью увлажнения почвы. Характер зависимости интенсивности испарения от влажности почвы в период ее просыхания при отсутствии осадков часто принимается линейным:

$$dh/dt = -e = -ke_0 h/h_{\max}, \qquad (3.19)$$

где h — слой почвенной влаги в данном ярусе почвы; t — время; e и e_0 — интенсивности испарения и испаряемости; k — доля вклада данного почвенного яруса в испарение (зависит от типа и состояния почвы и глубины распространения корневой системы растений); $h_{\max}$ — максимальная водоудерживающая способность почвы, т. е. минимальное количество влаги, при котором в процессе испарения полностью реализуются потенциальные возможности испаряемости.

Интегрирование уравнения (3.19) приводит к виду

$$E = h_0[1 - \exp(-kE_0/h_{\max})],$$

где E и E_0 — слои испарения и испаряемости за данный интервал времени; h_0 — начальное значение количества влаги в почве.

Важным вопросом оценки испарения является определение испаряемости (максимально возможного испарения при данных метеорологических условиях и при отсутствии ограничений по-

чвенных влагозапасов). В первом приближении E_0 пропорциональна дефициту влажности воздуха за расчетный период времени Δt:

$$E_0 = kd\Delta t/\cos\alpha,$$

где α — угол наклона площадки, град.; k — коэффициент испаряемости, значение которого колеблется обычно в пределах $(0{,}3—0{,}6)10^{-8}$ м/(мбар · с) в зависимости от типа испаряющей поверхности. Для снежного покрова, воды, голой почвы, скально-осыпного комплекса величина k может считаться постоянной. Для поверхностей с растительным покровом он может иметь годовой ход, отвечающий биологической динамике этого покрова. Здесь может быть применена трапецеидальная или синусоидальная «фенологическая» аппроксимация.

Испарение с суши или поверхности речного бассейна обычно называют суммарным. Под *суммарным испарением* понимают осредненное испарение, взвешенное по всем компонентам ландшафта — поверхности почвы и реголита, воды, льда, снежного покрова, растительного покрова (транспирация и испарение из емкости перехвата).

3.4.4. Особенности динамики воды в почве при неглубоком залегании уровня грунтовых вод

При близком к поверхности земли залегании уровня грунтовых вод вертикальный почвенный разрез можно подразделить на три части:

- нижнюю, затопленную грунтовой водой (насыщенную зону);
- зону капиллярной каймы;
- расположенную выше капиллярной каймы.

К верхней зоне относится все то, что было сказано о почвенном профиле при глубоком залегании уровня грунтовых вод. Влажность почвы здесь колеблется от уровня, соответствующего неподвижной влаге, до максимальной водоудерживающей способности. При транзитной фильтрации воды в течение короткого времени влажность может превышать максимальную водоудерживающую способность (МВС).

Насыщенная зона имеет переменную верхнюю границу (уровень грунтовых вод). Влажность почвы соответствует полной влагоемкости (пористости). Вопрос о наличии защемленного воздуха, что приводит к различию величин пористости и полной влагоемкости, в данном контексте не рассматривается. При его выраженном постоянном наличии он может быть приплюсован по объему к неподвижной влаге и вместе с ней составлять нечто целое с почвенным веществом. Грунтовая вода в пределах почвенного профи-

ля обычно поступает в локальную почвенную дренажную сеть, которая всегда более или менее развита в условиях регулярного периодического существования такого почвенно-грунтового стока.

Зона капиллярной каймы в силу своей специфики представляет особый интерес и требует введения специального понятия почвенной гидрологии — капиллярной влагоемкости. Последняя, не являясь почвенно-гидрологической константой, представляет собой некую функцию, изменяющуюся от полной влагоемкости на уровне грунтовых вод до МВС на верхней границе зоны в зависимости от глубины, исчисляемой вниз от поверхности почвы, и параметра, который может быть назван «предельной высотой капиллярного поднятия». Этот параметр в зависимости от структуры почвы и в первую очередь от механического состава почвы-реголита варьирует довольно в широком диапазоне: почти от нуля для крупнообломочных грунтов, отмытых от мелкозема, до 2—3 м для лессовидных суглинков.

Для нашей идеализированной дискретизированной системы расчетных слоев почвы (РСП) возникает необходимость в отслеживании динамики уровня грунтовых вод, а также в определении принадлежности каждого РСП к той или иной зоне.

Выразим слой капиллярной влагоемкости РСП следующим интерполяционным соотношением:

$$(h_{\text{кв}})_i = \{[1-(L-x_i)h_k^{-1}](\varepsilon_i \Delta x_i)^n + (L-x_i)h_k^{-1}(h_{\max}^n)_i\}^{1/n},$$

где L — глубина залегания уровня грунтовых вод; x_i и Δx_i — глубина расположения центра РСП и толщина последнего; h_k — капиллярный напор (предельная высота капиллярного поднятия); $h_{\max}$ — максимальная водоудерживающая способность. Показатель степени $n=1$ свидетельствует о линейности функций капиллярной влагоемкости.

Некоторая нелинейность, вроде бы наблюдаемая по эмпирическим данным, при желании может быть учтена соответствующим подбором величины n. Есть свидетельство, что удовлетворительная аппроксимация для некоторых типов почв достигается при $n=2$.

Капиллярная компенсация испарившейся влаги из зоны капиллярной каймы приводит к некоторому понижению уровня грунтовых вод, чему также способствует истечение воды из насыщенной зоны в виде почвенно-грунтового стока.

3.4.5. О подземных водах

Вода, покидающая систему почвенных горизонтов и верхних слоев почвообразующей (материнской) горной породы, т.е. зону потерь влаги на испарение и транспирацию, последовательно попадает в две более низко расположенные зоны.

Первая из них, по отношению к движущейся вниз воде, может быть названа транзитной. Она имеет постоянную влажность на уровне максимальной водоудерживающей способности или (непосредственно над зеркалом грунтовых вод) капиллярной влагоемкости. Другими словами, вода в пределах этой зоны протекает вниз без всяких потерь.

Вторая — это зона подземных вод, в пределах которых все пористые и трещиноватые породы насыщены водой. Главные интересующие нас свойства горных пород данной зоны — пористость и проницаемость. Эти свойства геологи и гидрогеологи называют *главными контролирующими факторами.*

По большому счету существуют лишь сильно идеализированные представления о неких подземных водоносных горизонтах, фильтрация воды в пределах которых описывается широко известным «законом» Дарси:

$$f = ki,$$

где k — коэффициент фильтрации; i — безразмерный гидравлический уклон или напор воды.

С увеличением размеров пор, особенно в карстовых районах, линейность «закона» Дарси, а следовательно, и предполагаемая ламинарность течения воды в водопроницаемых горизонтах, утрачиваются. На смену им в пределе приходят турбулентность и квадратичность «закона» фильтрации.

В общем случае мы воспринимаем зону подземных вод как мир водопроницаемых и водоупорных слоев горных пород, осложненных наличием разного рода трещин, пустот, карстовых полостей, водопродящих каналов. Объективной информации о свойствах горных пород и морфометрических показателях подземной гидравлической системы практически не существует, поэтому, в принципе, приходится опираться на самые общие, почти умозрительные представления о подземном питании рек, особенно, когда речь идет о числе и размерах водоносных горизонтов различных по глубине расположения ярусов, не говоря уже об их количественных характеристиках.

3.5. Склоновая трансформация стока

3.5.1. Проблема

Сразу после своего появления свободная вода, где бы это ни случилось — на поверхности, в почве или под землей, начинает свое путешествие к гидрографической сети под воздействием силы тяжести. Пути и условия стекания воды в пределах бассейна раз-

личны и часто замысловаты. И наши представления об этом, как ни странно, до сих пор не систематизированы и не упорядочены.

Поскольку речь идет о течении воды, то считается очевидным, что оно описывается уравнениями движения (сохранения импульса) и неразрывности (сохранения массы). Это известные в гидродинамике уравнения Навье—Стокса, а также их различные двух- и одномерные модификации, полученные при разных упрощениях и предположениях, — уравнения Сен-Венана, диффузионной и кинематической волны, а для подземных потоков — Буссинеска. Действительно, течение воды отвечает сущности уравнений движения, но в этом простом наборе уравнений, как это отмечено в Фейнмановских лекциях по физике, скрывается огромное разнообразие возможностей. И прямое описание с помощью этих уравнений природных процессов, и в том числе стока, к удачным результатам не приводило. Более того, рассматриваемые дифференциальные уравнения используются не в качестве аппарата, позволяющего описать истинную суть процесса, а только как математическое выражение другого идеализированного процесса, часто только весьма отдаленно напоминающего природное явление, интересующее нас.

Гидродинамика склонового стока и нерусловых потоков еще никем не разрабатывалась, более того, пока даже отсутствуют серьезные эмпирические предпосылки для этого. Наши представления о характере движения талых и дождевых вод в пределах речных бассейнов достаточно наивны и носят умозрительный характер. На первый взгляд, казалось бы, а многие именно так и полагают, что проблема почти ликвидирована, если записаны соответствующие дифференциальные уравнения и под рукой имеется компьютер и приемлемый способ численных решений записанных уравнений. Но насколько по-разному все это может быть сделано!

Сам процесс стекания воды по естественному склону представляется далеко не похожим на плавное движение сплошного и непрерывного слоя. Что же касается самого течения, то оно осуществляется в условиях непрестанного разветвления и слияния, склоновых микропотоков и струй, прокладывающих себе дорогу по поверхности почвы и по внутрипочвенным каналам, в осыпях и курумах, по камням и пластинам льда, по листьям и стеблям, по стволам деревьев, по крышам домов, площадям, аэродромам, дорогам и тротуарам. Непрерывные переходы между поверхностной и грунтовой формами стекания, между турбулентным и ламинарным течениями, между спокойным и бурным режимами. Интерференция поверхностных волн, эродирующая деятельность микропотоков, бомбардировка дождевыми каплями, ветер накладывают на эту картину дополнительный отпечаток. А шероховатость? Знакомая из курсов речной гидравлики и нормированная в таб-

лицах, на склонах она выступает уже в новой роли — в качестве элементов микротопографии склона, определяя изломы борозд и «пляску» локальных уклонов. Здешняя же шероховатость — камешки, песчинки, стебли травы — измеряется уже миллиметрами, но и глубины стекающих микропотоков часто с ней соизмеримы.

Поистине, для этой склоновой толчеи больших и малых порций воды трудно сформулировать математические рамки.

Какова альтернатива описанному подходу? Концепция стоковых элементов.

3.5.2. Концепция стоковых элементов

Речной бассейн представляет собой систему элементарных водосборов — поверхностных и подземных различных ярусов. Гидрографическая сеть, врезаясь в толщи горных пород, дренирует подземные воды, приуроченные к элементарным подземным водосборам. Системе русел различного порядка соответствует система элементарных подземных водосборов различных ярусов. Соотношения порядков водотоков и дренируемых ими подземных водосборов могут быть самыми различными и зависят от гидрографических, гидрогеологических и геологических структур конкретных бассейнов.

Топография поверхности речного бассейна условно может быть представлена системой поверхностей, «склеенных» друг с другом вдоль орографических линий, в качестве которых выступают русловая сеть и система водоразделов. В результате имеем своего рода скульптурную мозаику, сложенную из наклонных поверхностей, каждая из которых является элементарным склоном. Два элементарных склона, разделенные одним неразветвленным водотоком, составляют элементарный водосбор.

Подземные элементарные водосборы по сравнению с поверхностными обычно связаны с русловой сетью более высокого порядка. В пределах поверхностного элементарного склона стекание воды осуществляется по нерусловой микроручейковой сети, а в пределах подземного — по соответствующей подземной дренажной системе.

Элементарные склоны и водосборы в свою очередь состоят из системы стоковых элементов. Под последними понимаются ограниченные микроводоразделами участки поверхностных и подземных элементарных склонов и водосборов, обращенные своей открытой частью к склоновой нерусловой или подземной дренажной сети. Стоковые элементы являются не какой-то идеализацией, а легко могут быть отождествлены с естественными природными образованиями. Но только на поверхности. Подземные

стоковые элементы могут быть идентифицированы лишь в результате специальных исследований.

Когда мы видим участки затопленного леса в период «большой воды» или перешагиваем через шумные ручейки, несущие мутные воды из одной громадной лужи в другую среди полей и пашен, или то и дело попадаем ногами в воду на мокрых лугах — мы имеем дело с действующими стоковыми элементами. В горах они многократно мельче, чем на равнине, при больших уклонах даже миниатюрны. Поскользнувшись на глинистом склоне, мы способны разрушить сразу до десятка стоковых элементов — крохотных ячеек, моделирующих нечто вроде микроводосборов.

Концепция стоковых элементов качественно видоизменяет обычно рисуемую картину поведения талой или дождевой воды на склоне, видимо навеянную гидрологам впечатлением о стекании воды по асфальту.

Вода, способная к стеканию, прежде чем попасть в русловую сеть, рассредоточивается по стоковым элементам — природным образованиям, возникающим в результате ее взаимодействия с почвенным покровом и верхним слоем литосферы. Стоковые элементы соответственно могут быть поверхностными, почвенными и подземными. Их размеры изменяются в крайне широком диапазоне: от нескольких сантиметров (на поверхности эродированных склонов) до многих километров (в подземных литосферных структурах).

Теория стоковых элементов очень проста. В ее основе лежит балансовое соотношение $dW/dt = S - R$, где W — объем воды, аккумулированной стоковым элементом, м^3; S и R — соответственно приток и отток из него, м^3/с. Между объемом воды W и расходом истечения R существует однозначная нелинейная зависимость такого рода: $R = \beta[\exp(\alpha W) - 1]$. Соответствующее уравнение гидрографа истечения воды из стоковых элементов:

$$R = (S + \beta)/\{1 + [(S - R_0)/(R_0 + \beta)]\exp[-\alpha(t - t_0)(S + \beta)]\} - \beta,$$

где R_0 — значение интенсивности истечения из стокового элемента в момент времени t_0; α и β — коэффициенты, определяющие условия истечения.

При предположении, которое в дальнейшем не будет иметь значения, что склон или водосбор состоит из n одинаковых гидравлически изолированных стоковых элементов, выдвинем следующее положение:

$$\sum_{i=1}^{n} \beta_i[\exp(\alpha_i W_i) - 1] = b\left[\exp\left(a\sum_{i=1}^{n} W_i\right) - 1\right].$$

Это соотношение имеет смысл только при условии

$$a\sum_{i=1}^{n} W_i = \alpha_1 W_1 = \alpha_2 W_2 = \ldots = \alpha_n W_n, \quad b = \sum_{i=1}^{n} \beta_i.$$

Учитывая, что $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = \ldots = \alpha_n$, $\beta = \beta_1 = \beta_2 = \beta_n$, получим $a = \alpha/n$, $b = n\beta$.

Уравнение гидрографа притока к русловой сети со склона или водосбора соответствует таковому для стокового элемента, но коэффициенты α и β имеют уже новое обозначение — a и b. В общем случае мы можем полагать, что количество стоковых элементов пропорционально площади бассейна ($м^2$) или его части, и тогда $a = a^*/F$, $b = b^*F$. Коэффициенты a^* и b^* являются предметом нашего дальнейшего пристального внимания.

Оказалось полезным приписать коэффициенту a^* ($м^{-1}$) статус условной константы, регламентировав ее по видам стока, а коэффициент b^* (м/с) ввести в состав основных параметров модели формирования стока. Произведение $a^*b^* = \tau^*$ можно назвать характерным временем опорожнения стокового элемента. Дополнительно имеют смысл еще две характерные величины — интенсивность истечения q и запасы воды H. Они также определяются значениями условной константы a^*, параметра b^* и связаны соотношением $H = \ln(q/b^* + 1)/a^*$.

Ниже изложена некая правдоподобная идеализация — иерархическая последовательность ярусов расположения стоковых элементов, принимающих участие в питании рек и не противоречащая известным процессам, явлениям и закономерностям. Свидетельством о приемлемости предлагаемой системы является также ее удачное использование при моделировании гидрографов стока на реках любых размеров и находящихся в разных природных условиях. Все характерные величины стоковых элементов определяются условной константой a^* и медианным значением параметра $b^* = 10^{-6}$ м/с. Сама же константа последовательно определена выражением $a^* = 10^i$ при $i = 3$ для поверхностного стока, $i = 2$ для почвенного (табл. 3.9) и далее для различных ярусов подземного стока от $i = 1$ до $i = -6$ с шагом $\Delta = -0{,}5$ (табл. 3.10).

Таблица 3.9. **Система поверхностных и почвенных стоковых элементов**

Тип стока	a^*, $м^{-1}$	Характерные величины стоковых элементов		
		Время	Интенсивность истечения, л/(с · км²)	Запасы воды, мм
Поверхностный	1 000	17 мин	10^5	4,6
Почвенный	100	2,8 ч	10^4	24

Таблица 3.10. **Система подземных стоковых элементов**

№ яруса	Тип стока	a^*, $м^{-1}$	Характерные величины стоковых элементов		
			Время	Интенсивность истечения, л/(с · км²)	Запасы воды, мм
1	Быстрый грунтовый	10	1,2 сут	10^3	69
2		3,162	3,7 сут	464	121
3		1	11,6 сут	215	195
4	Грунтовый	0,3162	1,2 мес	100	301
5		0,1	3,8 мес	46,4	454
6		0,03162	1 год	21,5	674
7	Верхний подземный	0,01	3,2 года	10	995
8		3,162	10 лет	4,64	1464
9		10^{-3}	32 года	2,15	2152
		10^{-3}			
10	Глубокий подземный	3,162	100 лет	1	3161
11		10^{-4}	320 лет	0,464	4640
12		10^{-4}	1000 лет	0,215	6812
		3,162			
		10^{-5}			
13	Исторический подземный	10^{-5}	3200 лет	0,1	10000
14		3,162	10000 лет	0,0464	14678
15		10^{-6}	32000 лет	0,0215	21540
Σ					67256

Примем некое положение, логичное, но предполагаемое: емкостные и фильтрационные свойства водовмещающих горных пород закономерно уменьшаются с глубиной. Одновременно должны быть учтены два эмпирических факта — уменьшение с глубиной интенсивности истечения подземных вод в речную сеть и одновременное увеличение запасов воды в подземных горизонтах. Итак, постулируем следующую иерархическую систему расположенных друг под другом ярусов стоковых элементов, соответствующих различным типам подземного стока и совместно питающих речную сеть (табл. 3.10).

Любопытно сопоставить сумму характерных запасов воды в системе подземных стоковых элементов всех ярусов, составившую 67256 мм (без 15-го яруса 45716 мм) с данными из различных источников: от 48400 до 70800 мм.

Нарисованная гипотетическая картина гидрологии подземных стоковых элементов преследует следующие цели:

• связать схему моделирования с известными сведениями о запасах подземных вод;

• констатировать особую сложность и неразрешенность проблемы подземного питания, а также бессилие традиционных подходов;

• дать основание для развертывания критики и дальнейшей дискуссии по проблеме.

• предоставить информацию к размышлениям будущих гидрологов.

3.6. Русловая трансформация стока

3.6.1. Проблема

Русловая трансформация — заключительный акт того сложного комплексного процесса, который называют *формированием стока*, и гидрограф стока в замыкающем створе некий его наблюдаемый итог. Одновременно он — конечная цель расчетов и моделирования.

Движение воды по русловой сети выполняет вполне определенную функцию — переносит воду из областей формирования стока в замыкающий створ с соответствующим сдвигом во времени. Все это сопровождается эффектами неустановившегося движения водных русловых потоков, неравномерностью распределения скоростей по живому сечению потока, влиянием емкостного (русла, поймы, старицы, прирусловые озера и болота) регулирования.

Обычно считается, что наиболее полно учитывают основные особенности неустановившегося движения воды в открытых руслах уравнения Сен-Венана:

уравнение движения

$$\alpha_1 \partial v/\partial t + \alpha_2 v \partial v/\partial x + g v|v|/C^2 H + vq/H = g(\sin\alpha - \partial H/\partial x); \quad (3.20)$$

уравнение неразрывности

$$\partial H/\partial t + v\partial H/\partial x + H\partial v/\partial x = q, \quad (3.21)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения скоростей по живому сечению ($1 < \alpha_1 < 1{,}3$; $1{,}1 < \alpha_2 < 6$); t, x, H, v — соответственно время, расстояние, глубина и средняя по живому сечению скорость потока; q — боковой приток на единицу ширины и длины русла; C — коэффициент Шези.

Обычно не очень обращают внимание на недостатки этой модели. К ним следует отнести необходимость введения таких не-

определенных коэффициентов, как α_1 и α_2, но в первую очередь следует говорить о теоретической и практической неполноценности члена трения, содержащего неудачный коэффициент Шези. Использование этого коэффициента в любой его модификации вызвано только неполнотой наших представлений о процессах сопротивления при нестационарных течениях. Дополнительной и почти неразрешимой проблемой является необеспеченность расчетов морфометрической информацией и какими-либо надежными сведениями о шероховатости русел.

Тем не менее, использование модели Сен-Венана вполне оправдано при отдельном и индивидуальном для каждого объекта моделировании. Можно утверждать, что она предназначена для больших скоплений водных масс, организованных в достаточно простые системы (участки крупных рек, эстуарии, проточные озера и водохранилища) в условиях активного проявления эффектов неустановившегося движения (волны, возникающие при разрушении плотин, попусках, прохождении паводков и половодий, сгонно-нагонных явлениях).

Если в уравнении (3.20) оставить только член трения и уклон дна, т.е. свести его к уравнению Шези, то последнее совместно с уравнением (3.21) составит модель кинематической волны.

Расчеты в этом случае существенно упрощаются, но все перечисленные проблемы при этом остаются. И еще остается иллюзия достигаемой точности.

В основе иного подхода к описанию трансформации стока лежит идея преобразования гидрографа притока к русловой сети в гидрограф стока в замыкающем створе. Под *притоком к русловой сети* $R(t)$ понимается интеграл распределенного по длине всей этой сети бокового притока $r(l, t)$, м^2/с:

$$R(t) = \int r(l,t)\, dl.$$

Задача в общем виде решается с помощью операции линейной фильтрации:

$$Q(t) = \int_0^t g(\tau) R(t-\tau)\, d\tau. \qquad (3.22)$$

Выражение (3.22) называют линейным фильтром, интегралом свертки, интегралом Дюамеля. Таким образом, $Q(t)$ представляет собой среднее значение $R(t)$, взвешенное в соответствии с величиной функции $g(\tau)$ по оси времени от момента 0 до момента t, если в качестве R выступает дельта — функция Дирака. Синонимы названия функции $g(\tau)$ — весовая функция, импульсный отклик, импульсная переходная функция, функция влияния, а в гидрологии — кривая добегания стока, кривая распределения межизохронных площадей, единичный гидрограф.

Весовая функция $g(\tau)$ аналогична функции плотности вероятности и может быть аппроксимирована подходящим законом распределения. В гидрологии чаще всего используется гамма-распределение, в частности однопараметрическое:

$$g(\tau) = \tau^{n-1} \exp(-\tau)/\Gamma(n).$$

Гамма-распределению отвечает кривая плотности вероятности, не ограниченная справа. Однако время руслового добегания конечно, и интеграл (3.22) можно представить в виде

$$Q(t) = \int_0^{\tau_{max}} g(\tau) R(t-\tau)\, d\tau, \qquad (3.23)$$

где τ_{max} — максимальное время руслового добегания. В этом случае подходящей аппроксимацией является ограниченное с обеих сторон бета-распределение. В самом простом случае, когда весовая функция $g(\tau)$ равномерна в диапазоне от 0 до τ_{max}, интеграл в выражении (3.23) превращается в оператор скользящего осреднения гидрографа притока по интервалу времени τ_{max}. В частности, учет русловой трансформации паводков на малых водосборах с помощью операции скользящего осреднения по времени добегания оказался непостижимо удачным.

Физическая интерпретация весовой функции может быть связана с известными в классической гидрологии представлениями о формировании паводков, в частности с «генетической формулой стока». В этом случае она имеет вполне определенный гидрологический смысл как функция, описывающая распределение площади бассейна по времени руслового добегания. Однако оценка весовой функции по топографическим картам приводит к большим ошибкам.

3.6.2. Феноменологическая концепция времени добегания

Рассредоточенная масса воды, перемещающаяся по русловой сети большого речного бассейна, представляет собой некую грандиозную разветвленную систему, состоящую из неисчислимо большого числа элементов — участков русел различных порядков. В крупных бассейнах число таких элементов может исчисляться многими миллионами. Поэтому прямой последовательный расчет движения воды в такой сложной системе, хотя бы и в условиях неизбежного укрупнения ее элементов, является своего рода безумием.

Организовать пространственно-временное вычислительное слежение за расходами воды по всей русловой системе невозможно в связи с полным отсутствием каких-либо наблюдений в этой обла-

сти, что не позволяет использовать обратные оценки и осуществлять хоть какой-нибудь удовлетворительный контроль. Единственным источником сведений, как всегда, остается наблюденный гидрограф стока в замыкающем створе. Ориентируясь единственно на этот источник в рамках многофакторных надуманных моделей, можно получить бесчисленное множество решений, якобы приводящих к желательному результату, но объективная идентификация которых просто невозможна.

Итак, идея построения методики расчета добегания стока от мест его формирования к замыкающему створу по русловой сети бассейна на основании неполноценных данных об уклонах, морфометрии, шероховатости, глубинах представляется утопической. Методология обратных оценок приводит к сплошным иллюзиям, ибо параметры применяемых моделей, оцененные таким образом, не подлежат ни систематизации, ни обобщению, ни нормированию и чаще всего даже не правдоподобны.

Все сказанное наводит нас на мысль — строить наши модели на основе принципиально других подходов. Должна быть принята иная феноменологическая концепция добегания воды, исключающая детализацию, которая не только ничего не дает для понимания целого, но и абсолютно заслоняет последнее, создавая у гидрологов иллюзию, что они полностью контролируют ситуацию.

Альтернативная концепция предельно проста. Она состоит из двух положений:

- для любой точки, выбранной по тем или иным причинам в бассейне, время руслового добегания принимается постоянным;
- в основе определения этого постоянного времени добегания лежит использование непосредственно наблюденных средних по поперечному сечению речных потоков скоростей течения.

3.7. Соотношение стока и динамики воды в бассейне

Уравнение водного баланса речного бассейна в самом общем виде:

$$dW/dt = Q_1 - Q_2 - Q_3, \qquad (3.24)$$

где W — объем воды в бассейне, м^3; t — время; Q_1 — осадки и конденсация; Q_2 — испарение и транспирация, участие в приросте биомассы; Q_3 — сток в замыкающем створе, м^3/с. Если Q_1, Q_2 и Q_3 есть интенсивности процессов, то W — главная интегральная гидрологическая переменная состояния бассейна.

Количество воды в речном бассейне в каждый данный момент времени слагается из запасов воды в сезонном снежном покрове, в ледниках, снежниках, фирновых полях и наледях, в раститель-

ном и почвенном покрове, в рыхлообломочных горных породах, в озерах, прудах, болотах и лужах, в подземных геологических структурах, в русловой сети.

Гидролог воспринимает речной бассейн как некую динамическую природную систему, порождающую сток. Поэтому расход воды в замыкающем створе Q_3 и главная переменная состояния бассейна W являются координатами некоторого двухмерного абстрактного «*фазового пространства*».

Вообще фазовое пространство речного бассейна представлено множеством его всевозможных состояний. Поскольку бассейн является распределенной динамической системой, то его фазовое пространство многомерно и даже бесконечномерно. Состояние бассейна в некоторый момент времени изображается точкой в этом пространстве. Изменение состояния бассейна и его производительности как генератора стока описывается кривой, называемой *фазовой траекторией.* Фазовое пространство, заполненное фазовыми траекториями, составляет *фазовый портрет* речного бассейна.

Двухмерное фазовое пространство обладает таким важным свойством, как наглядность. На рис. 3.1 изображен фазовый портрет состояния одного из небольших горных бассейнов (р. Варзоб, южный склон Гиссарского хребта, Таджикистан, площадь бассейна 1 279 км^2) за 1972 г. (осадки 1 832, испарение 532, сток 1 177 мм). На рис. 3.2 приведен гидрограф стока за этот же год. Фазовый портрет является для него хорошим информационным дополнением.

Обращает на себя внимание, что фазовая траектория за отдельный год представляет собой петлю, хронологически направленную против часовой стрелки и растянутую вдоль оси $H = W/F$, где F — площадь бассейна, на 700 мм и вдоль оси Q_3 на 100 м^3/с. Общий относительно гладкий вид траектории нарушается только обратными (по часовой стрелке) петлями-выбросами, отображающими прохождение пиков паводков.

На рис. 3.3 представлены фазовые траектории состояния этого же бассейна в течение четырех лет подряд, а на рис. 3.4 — гидрографы стока за эти же годы. Четко отражена годичная периодичность и соотношение фазовых портретов бассейна в разные по водности годы.

Возникает вопрос — насколько типичен подобный фазовый портрет для речных бассейнов вообще? Следует иметь в виду, что основные примеры фазовых портретов и соответствующих им гидрографов относятся к горному бассейну (диапазон высот 970—4491 м) с небольшим оледенением и довольно значительным сезонным покровом, достаточно сложно распределенным по высотным зонам, и соответствует только одному и четырем годам. Дополнительно приводим фазовый портрет и гидрограф стока для бассейна р. Индигирки у села Воронцово (305 000 км^2) за 1961 г. (рис. 3.5 и 3.6). Для более полного представления о

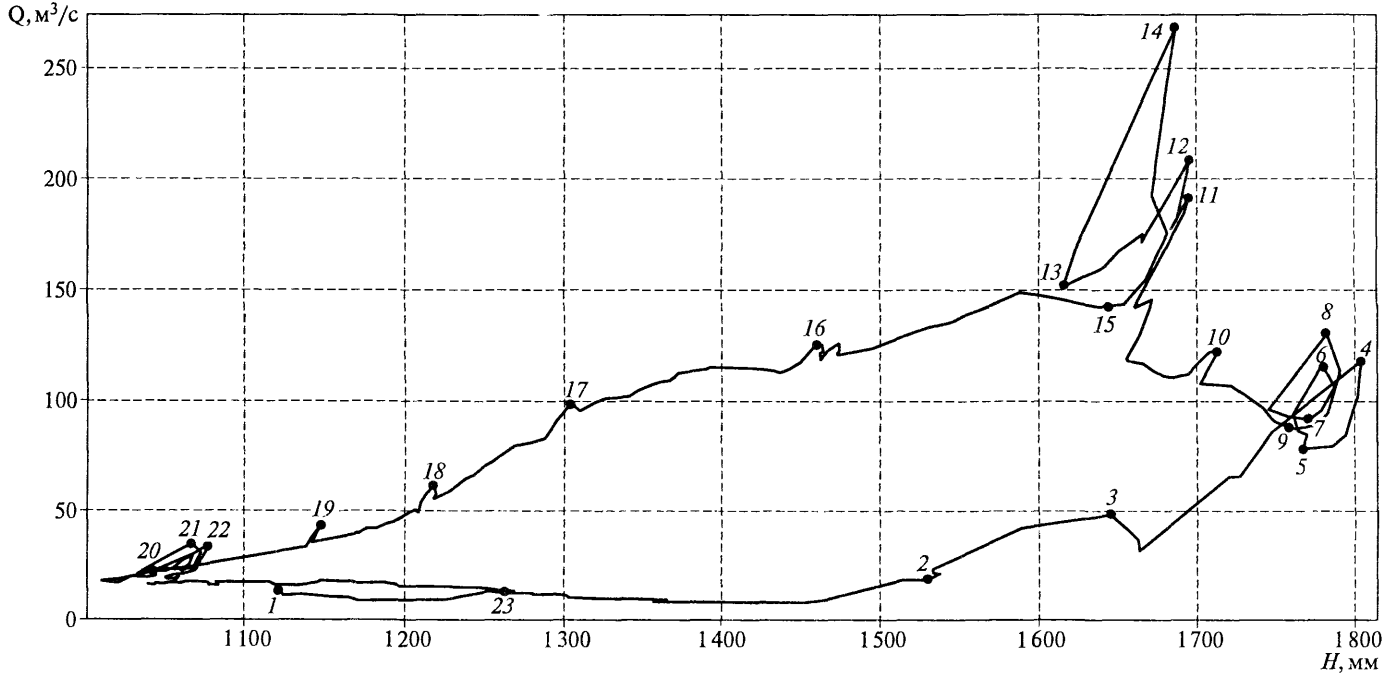


Рис. 3.1. Фазовый портрет состояния горного бассейна р. Варзоб у кишлака Дагана (F= 1 279 км^2, Южный склон Гисарского хребта, Таджикистан) в 1972 г.

На фазовой траектории отмечены номера точек, соответствующих таковым на гидрографе стока (см. рис. 2.7)

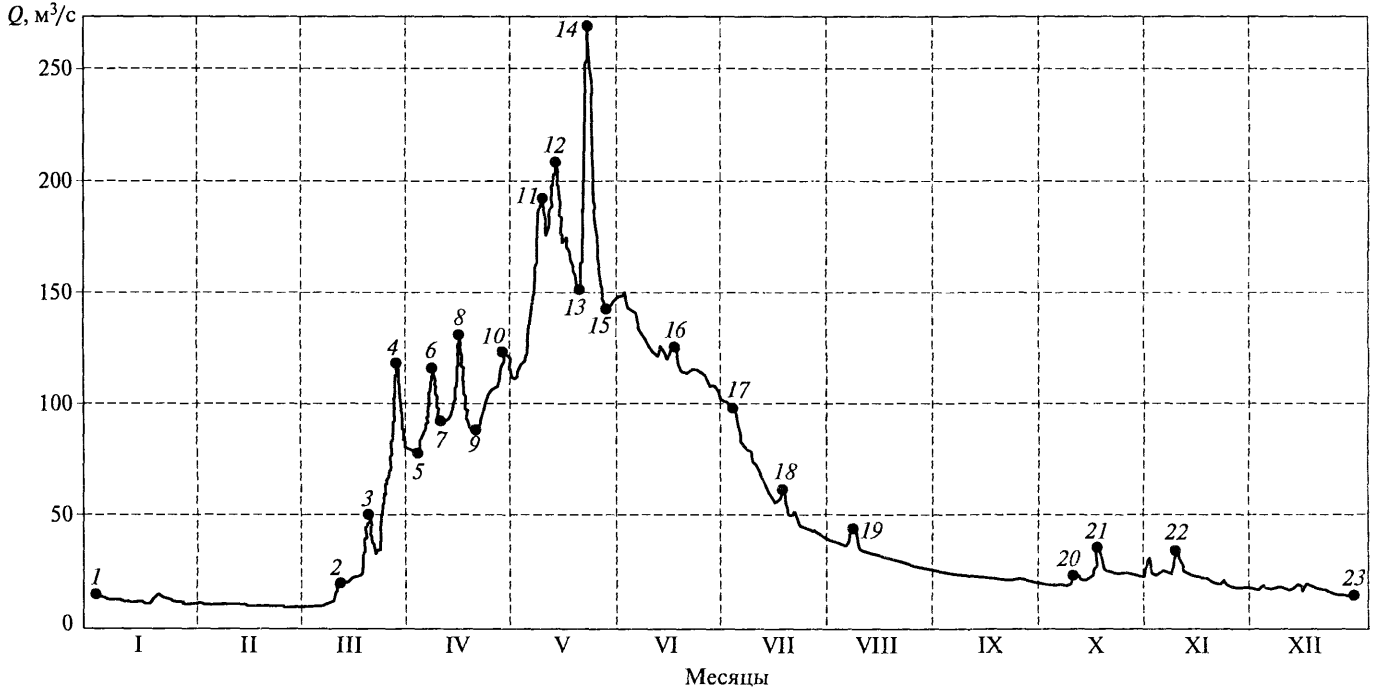


Рис. 3.2. Гидрограф стока р. Варзоб у кишлака Дагана, 1972 г.

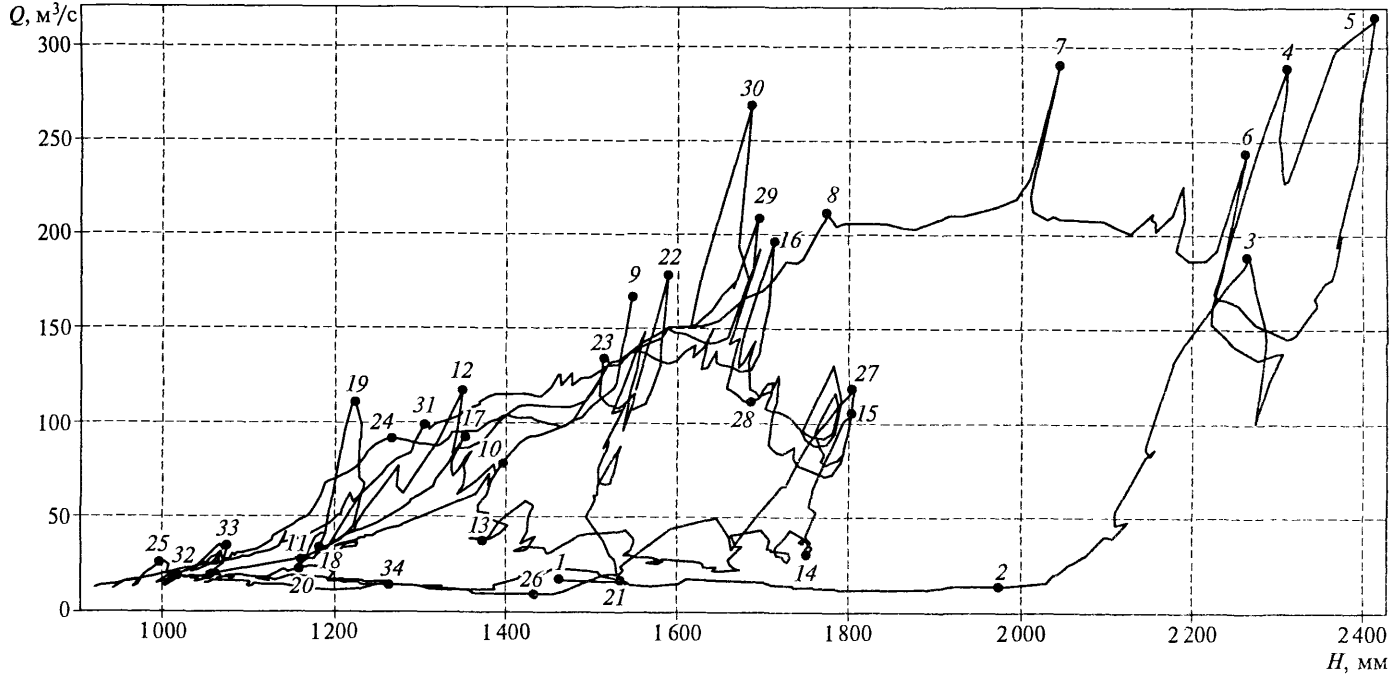


Рис. 3.3. Фазовый портрет состояния горного бассейна р. Варзоб у кишлака Дагана (F= 1 279 км^2) за 1969—1972 гг.
На фазовой траектории отмечены номера точек, соответствующих таковым на гидрографе стока (рис. 3.4)

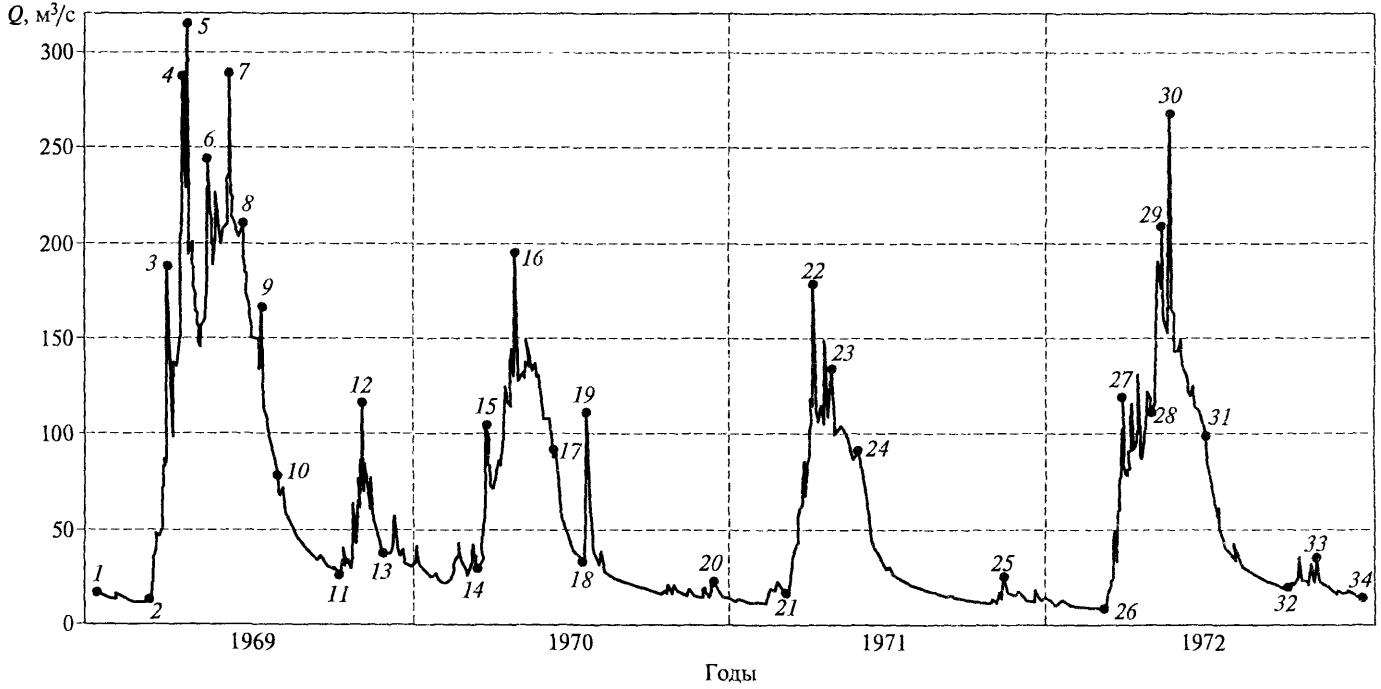


Рис. 3.4. Гидрограф стока р. Варзоб у кишлака Дагана за 1969—1972 гг.

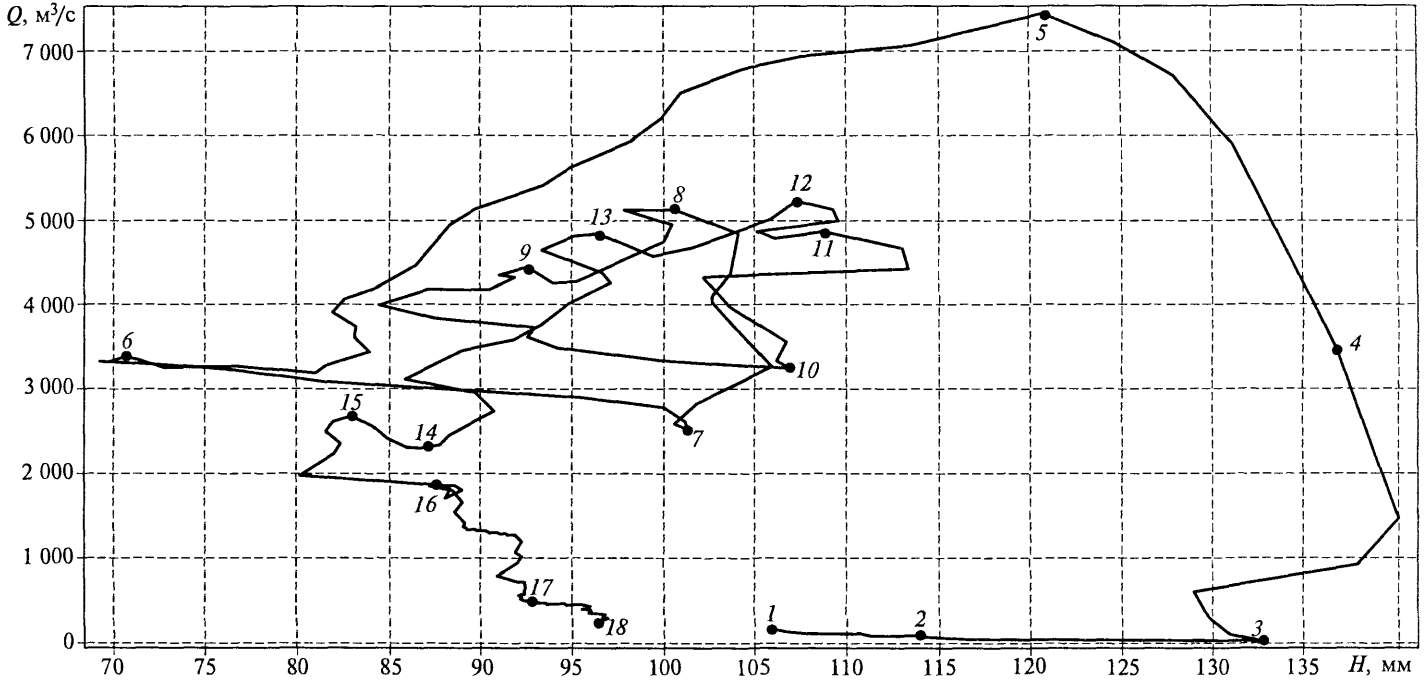


Рис. 3.5. Фазовый портрет состояния бассейна р. Индигирки у села Воронцово (F= 305 тыс. км^2) в 1961 г.
На фазовой траектории отмечены номера точек, соответствующих таковым на гидрографе стока (см. рис. 3.6)

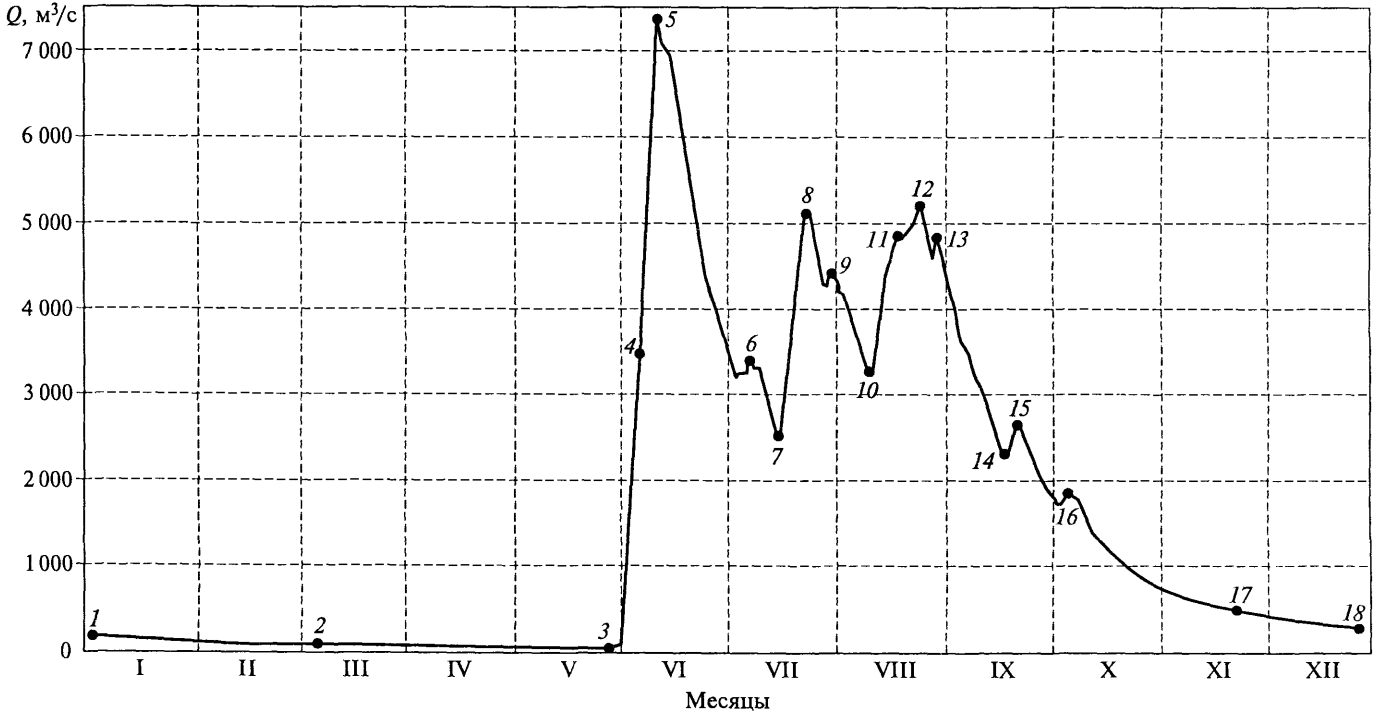


Рис. 3.6. Гидрограф стока р. Индигирки у села Воронцово в 1961 г.

поведении бассейна необходима подобная информация за многолетие. Единственный реальный способ получения фазовых портретов динамического состояния речных бассейнов — это полноценное математическое моделирование процессов формирования стока.

Полезно рассмотреть крайние возможные варианты фазовых портретов речных бассейнов.

1. Водонепроницаемая поверхность с почти мгновенным поступлением воды в русловую сеть. Только последняя в основном и трансформирует сток, причем незначительно. Фазовые траектории в этом случае занимают узкую полосу фазового пространства, простирающуюся вдоль оси Q_3.

2. Бассейн, где температура воздуха круглый год намного ниже нуля (что-то вроде ледяного купола Восточной Антарктиды). Если предположить, что пластичное течение ледяной массы — это тоже «сток», то фазовые траектории останутся в пределах узкой полосы, на этот раз вдоль оси W (или $H = W/F$, где F — площадь бассейна).

3. Температура воздуха в бассейне всегда положительна, снега и льда не бывает. Последовательно проходят дождевые паводки, обычно хорошо выражен более сухой меженный период. Эти паводки отображены и в поведении фазовых траекторий, совершающих взлеты к максимальным расходам по более пологим линиям, чем при обратном движении. Взлеты и падения фазовых траекторий вместе с более спокойной линией меженного периода и составляют фазовый портрет такого бассейна. Петли траектории обычно направлены по часовой стрелке и этим напоминают паводковые петли на графиках гидрометрических зависимостей расходов от уровней. Более упорядоченными представляются фазовые портреты крупных бассейнов в тропической зоне.

Наряду с водным балансом круговорота воды то же самое уравнение (3.24) соответствует круговоротам и законам сохранения других веществ (углерода, кислорода, азота, серы, фосфора, минеральных соединений, разного рода загрязнителей, в том числе радионуклидов) и энергии. Если рассматривать уравнение (3.24) как описывающее тепловой баланс, то в этом случае Q_1 — поступление тепловой энергии (солнечная радиация, теплообмен с атмосферой, поступление вместе с осадками, выделение при фазовых переходах, биохимических процессах и при переходе потенциальной энергии водных потоков в другие виды энергии); Q_2 — расходование тепловой энергии (потери на излучение и при теплообмене с атмосферой, использование при фазовых переходах, потребление при создании биомассы, потери на испарение и транспирацию); Q_3 — потери энергии вместе со стоком воды и других веществ через замыкающий створ; W — теплосодержание всего бассейна.

Анализ фазовых портретов поведения речных бассейнов открывает некоторые дополнительные перспективы в понимании процессов формирования стока, а возможно и его прогнозирования.

Проблема адекватного словесного и математического описания формирования стока напрямую связана с успехами экспериментальной гидрологии. Основной недостаток последней — частое проведение экспериментов и наблюдений в отрыве от теории стока (смысл эксперимента — в самом эксперименте). Попытки накапливать данные впрок редко приводили к успеху.

Главное условие эффективности экспериментальной гидрологии — это обязательное сочетание теории, наблюдения, эксперимента, математического моделирования. Игнорирование любого из четырех названных элементов ведет в тупик. Хотя все широко используют понятие «экспериментальная гидрология», сами гидрологи больше наблюдают, чем экспериментируют.

3.8. Ландшафт — стокоформирующий комплекс

Земная поверхность может быть разделена на отдельные участки, в пределах которых процесс формирования стока представляется качественно единообразным, а их количественные физические характеристики могут быть осреднены. Назовем такой участок стокоформирующим комплексом (СФК), понимая под ним часть территории бассейна условно однородную в гипсометрическом, гидрографическом, геологическом, гидрогеологическом, геоботаническом и педологическом отношениях.

Предполагается, что все параметры модели характеризуют СФК в целом, неизменны в его пределах и скачкообразно изменяются на его границах.

Что касается соотношения понятий СФК, ландшафта и экосистемы, то можно было бы назвать их синонимами. Но само выделение этих понятий в принципе имеет различную направленность. И когда анализ природных особенностей речного бассейна ведется с позиций изучения формирования стока, мы приходим к СФК. Существуют две главные формы обобщения сведений при выделении СФК — генерализация и типизация.

Генерализация связана с масштабными проблемами моделирования стока, типизация — с самой необходимостью выделить СФК, классифицировать их и снабдить параметрической информацией.

Представим себе ограниченный в пространстве ландшафт. Если не только иметь в виду внешний его облик, но и попытаться приписать ему систему взаимосвязанных природных и антропогенных процессов, то, даже не вторгаясь в микромир, можно назвать бесчисленное множество последних:

выпадение осадков, приход солнечной радиации, конвективный теплообмен, испарение, оседание пыли, принос семян и спор растений, вынос и принос вещества животными организмами, динамика почвенной влаги, формирование почвенного и поверхностного стока, рождение новой животной и растительной жизни, развитие растений и рост животных, гибель растительных и животных организмов, разложение их останков, опыление цветов, фотосинтез, транспирация, всасывание почвенной влаги корнями растений, цветение, эрозия почвы, поедание пищи, вызревание и прорастание семян, вывоз леса, торфа, сена, зерна, овощей, вынос грибов и ягод, лесоразработки, лесопосадки, мелиорация, сельскохозяйственные мероприятия, распыление химических веществ, загрязнение территории и др.

Перечень бессистемен, случаен, безмерно сокращен. Важно осознать, что процессов очень много и что каждая отрасль науки выделяет свою систему процессов, отображая все остальные интегрально и косвенно.

Действительно, среди великого множества взаимосвязанных явлений, этакого клубка событий, гидрология как бы высвечивает определенный круг процессов, остальные же чем больше удалены от нее, тем выражены более неопределенно. Но о самом их существовании мы должны помнить постоянно. Их присутствие отображается значениями параметров гидрологических моделей.

Необходимо понимать тот факт, что ландшафт, выступающий в качестве СФК, одновременно является объектом исследований с совершенно иных точек зрения. Пересечения различных отраслевых научных интересов могут привести к неожиданным и чрезвычайно полезным результатам. Сейчас мы, насквозь пропитанные инженерным духом, до конца и не подозреваем, насколько нужны гидрологическая теория и гидрологические модели геохимии, экологии и всем наукам, объединенным интересами охраны окружающей среды.

3.9. Особенности условий формирования стока в различных природных зонах

Рельеф, температура воздуха и количество осадков — главные факторы, определяющие существование природных зон, ландшафтов, биомов, СФК. Ниже приведены несколько характерных примеров различных условий формирования стока.

Тундра и лесотундра. Специфика территории — сложное и противоречивое взаимодействие между мерзлотой и жидкой водой.

Мерзлота препятствует просачиванию, и вода скапливается на поверхности. Все переполнено водой — озера и озерки, почти всегда проточные, неглубокие болота, протаявший деятельный слой. С последним часто смыкаются надмерзлотные грунтовые воды. Испарение низкое. После каждого дождя проносятся паводки. Малые и даже средние реки надолго перемерзают.

Холодные хвойные леса — тайга. Высока роль перехвата жидких осадков растительным покровом. Лесная подстилка, мхи и лишайники гасят поверхностный сток, аккумулируют влагу, снижают испарение с почвы. Там, где есть мерзлота, она препятствует инфильтрации, и дождевые паводки хорошо выражены. Но чаще доминирует половодье. На плоских низменностях при очень малых уклонах — сильная заболоченность.

Классический пример — Западная Сибирь. Мощные толщи торфа и болотной растительности хорошо регулируют водный режим территории.

Один из самых экзотических ландшафтов в пределах гор и плоскогорий — курумы (поля крупных каменных обломков, свободно лежащих друг на друге, причем нижние погружены в мерзлую обломочную породу). Во время ливня внутри курумов слышен грохот водных потоков.

Низкотравные прерии — степи. Зона недостаточного и неустойчивого увлажнения. Контрасты погоды и стока. Важна роль снежного покрова. Характерен метелевый перенос снега с приводораздельных пространств в понижения, балки, овраги и русловую сеть. На сток может сильно влиять промерзание почвы. В девственной степи талые и дождевые воды сильно задерживались степным войлоком. Горизонт почвенных и грунтовых вод был выше, родники — более многочисленными и режим их — более устойчивым. Чрезмерная распаханность — причина иссушения территории, активизации поверхностного стока и эрозии.

Аридная зона — сухие степи, полупустыни, пустыни. Скудная и выгорающая в засушливый период травянистая растительность. Активный поверхностный сток. Мощная эрозия. В предгорьях распространены бедленды. Большая разница между испарением и испаряемостью.

Экваториальные дождевые леса. Как говорит само название, осадков здесь очень много (более 2 000 мм). Наибольшее среди всех других природных зон разнообразие жизни и количество биомассы на единицу площади. Различаются две гидрологически важные формы — сезонно затопляемые и незатопляемые. Затопленная территория немедленно реагирует на дожди, более возвышенная хорошо дренирована и аэрируема. Классические примеры — бассейны Амазонки и Конго.

Приведенные сведения хорошо подтверждают факт величайшего многообразия условий формирования стока.

3.10. Выводы

Процесс формирования стока объединяет множество частных процессов, связанных с общим явлением перемещения воды, выпавшей на поверхность суши, обратно в океан. При анализе этого явления выделяются два аспекта: водно-балансовый (в центре внимания — «потери» стока) и временной (связанный с перераспределением стока во времени).

Исключительно важна концепция динамического состояния речного бассейна. Интегральная характеристика состояния — это количество твердой и жидкой воды в бассейне в каждый данный момент времени. Календарная последовательность точек в системе координат: расход в замыкающем створе — накопление воды на водосборе — представляет собой фазовую траекторию, характеризующую поведение речного бассейна как систему, преобразующую осадки в сток.

Не менее важна концепция стоковых элементов. Система последних определяет соотношение между объемом подвижной воды, находящейся в бассейне, и интенсивностью ее притока в русловую сеть, другими словами — форму движения воды в бассейне. Стоковые элементы — поверхностные, почвенные и подземные — характеризуются различной растянутостью во времени их реакции на приток воды. Если для поверхностного стока — это минуты, то для подземного нижних ярусов — века и тысячелетия.

Очень разнообразны условия формирования стока в различных природных зонах и ландшафтах.

ГЛАВА 4
ЭРОЗИЯ И БАССЕЙНОВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

4.1. Проблема

Изучение взаимосвязанных процессов стока и загрязнения территории — одна из актуальнейших задач системы наук об окружающей среде. Взаимосвязанность двух названных процессов предопределена их существенными особенностями. Формирование стока — процесс первичный и независимый, второй же связан со всеми видами стока. В то же время, решение такой задачи — крайняя практическая необходимость.

Естественными объектами исследования и моделирования в рассматриваемом здесь отношении выступают организованные самой природой уникальные динамические системы — речные бассейны. Процитируем, что думает об этом эколог Ю. Одум: «Причины загрязнения вод и способы борьбы с ним не удается обнаружить, если изучать только воду; наши водные ресурсы страдают обычно из-за плохого хозяйствования на всей площади водосборного бассейна, который и должен рассматриваться как управляемая единица».

Итак, объект исследования — речной бассейн. После первичного распределения загрязняющего вещества по территории любая его миграция определяется исключительно динамикой воды, а вынос его за пределы территории — речным стоком. Потенциальная возможность поступления загрязняющего вещества в русловую сеть вместе с дождевым и талым стоком зависит от степени истощения источника загрязняющего вещества, т.е. от длительности его пребывания на территории и погодных условий за этот период. Поскольку всегда существует тесная связь выноса загрязняющего вещества с интенсивностью процесса стокообразования, то полноценные выводы о выносе загрязняющего вещества за пределы территории и вообще его динамики возможны только на базе математического моделирования стока и концентрации загрязняющего вещества во всех фазах гидрологического цикла (межень, половодье, дождевые паводки). Все сказанное определяет необходимость совместного математического описания процессов формирования стока и загрязнения.

В качестве результатов моделирования формирования стока, эрозии и загрязнения в его пределах выступают гидрографы жид-

кого и твердого стока и стока загрязнителя в замыкающем створе. Дополнительной является информация о распределенных переменных состояниях, отражающих температурный, фазовый, водный и химический режимы почвы и, если он есть, снежного покрова, в заданные моменты времени.

Вопросы формирования стока рассмотрены в предыдущей главе, здесь же упор сделан на процессы эрозии и загрязнения.

4.2. Предпосылки

4.2.1. Эрозия

Разделим общий процесс эрозии (он же процесс формирования твердого стока) на два этапа: *бассейновый* (площадной) и *русловой* (линейный). Первый этап связан с поверхностным стокообразованием, эрозионным размывом почв, слагающих поверхность водосбора, и поступлением в русловую сеть той части наносов, которую И. В. Егиазаров назвал наносами «нерусловыми» (< 0,05 мм) и зависящими «не от русловых условий, а от площади бассейна, интенсивности ливня и наличия на склонах мелких фракций». Второй этап — процесс взаимодействия потоков суспензии с русловым аллювием или пролювием — здесь не рассматривается. Таким образом, предметом нашего внимания является склоновая (плоскостная, струйчатая, микроручейковая) водная эрозия.

Везде, где формируется поверхностный сток, он сопровождается эрозионными проявлениями. Активность эрозии определяется двумя главными факторами — интенсивностью поверхностного стокообразования и податливостью почвы или рыхлой горной породы размыву. Она изменяется в очень широких пределах — от спокойного, медленного, но неуклонного процесса, обычно так и называемого «нормальной эрозией», вплоть до своих крайних проявлений. Последнее наблюдается в районах сильнейших ливней, скудной растительности, низкой инфильтрационной способности и высокой размываемости почвы. Во всех случаях наличие поверхностного стока оставляет признаки его эрозионной работы. В частности, об активности такого рода деятельности можно судить по выраженности и густоте склоновой микроручейковой сети. В наиболее предельной форме она проявляется в бедлендах, где может достигать на крутых глинистых обнаженных склонах 5 м/м^2.

Влияние уклона на процесс эрозии можно оценить, рассмотрев соотношение сил, воздействующих на почвенную частицу. Сдвигающая сила пропорциональна $\sin \alpha$, прижимающая струи воды к склону — $\cos \alpha$. Поэтому будем полагать, что интенсив-

ность эрозии при прочих равных условиях пропорциональна произведению $\sin\alpha \cdot \cos\alpha$, из чего следует, что своего максимального значения она достигает при $\alpha = 45°$. Тогда о соотношении интенсивности эрозии на склонах разной крутизны можно судить по следующим относительным цифрам:

5° — 0,174; 10° — 0,342; 30° — 0,866; 45° — 1; 60° — 0,866 и т.д.

Районы особенного проявления поверхностного стокообразования и эрозионного размыва в основном находятся в пределах аридной и полуаридной зон, особенно в горах и предгорьях. Эрозия ослабевает в полосе лесов, но может быть катастрофичной в зоне многолетней мерзлоты, как в горах, так и на равнине.

Специальная литература по эрозиоведению многочисленна, но по сути малосодержательна. Обычно даже при теоретическом анализе склоновой эрозии рассматривается транспортирующая способность русловых потоков. Параллель между процессами склоновой и русловой эрозии возведена в своего рода методологический принцип. Думаем, что многие минусы такого подхода вряд ли искупаются ложной идеей отождествления склоновых и русловых процессов, объединяемых словом «эрозия».

Другой распространенный подход — выявление многофакторных зависимостей показателей эрозии. Это даже не множественная регрессия, что в данном контексте уже научное бедствие, а аппроксимация крайне опасными выражениями типа $E = A_1 A_2 ... A_n$ или $E = A_1 + A_2 + ... + A_n$, где A с индексами от 1 до n — различные факторы.

Более естественно установление однозначных зависимостей стока наносов и воды. Такого рода зависимости показательны для стоковых площадок и микроводосборов. Однако «рассев» эмпирических точек здесь столь значителен, что объяснить его только неточностями и случайностями невозможно. Действительно, здесь проигнорированы и уклоны, и интенсивности осадков или снеготаяния, да и дискретизация функционального пространства по типам склоновых ручьев очень условна.

Аналитический вариант этого же подхода имеет вид

$$V = sH^m,$$

где V — объем стока наносов с единицы площади; s — эмпирический коэффициент, среди прочих факторов учитывающий и уклон, $m > 1$; H — слой жидкого стока.

Здесь мы сталкиваемся с неким противоречием, состоящим в том, что между H и V при прочих равных условиях может существовать только линейная зависимость. Постулируемая же нелинейность ($m \neq 1$), видимо, вызвана положительной корреляцией между слоем стока и его средней интенсивностью. Непрямой учет таких косвенных влияний всегда нежелателен.

Появление в эмпирических проработках различных показателей степени при уклоне (обычно нельзя понять, имеется в виду $\sin\alpha$ или $\operatorname{tg}\alpha$), иногда превышающих единицу, но чаще наоборот, видимо, связано с попыткой отобразить косвенное влияние уклона на свойства почвы. Показательно в этом отношении, например, бронирование почвы отмываемой щебенкой, особенно на крутых участках склона. Мы допускаем здесь и объяснение об искажениях истинного уклона, когда вода стекает не строго вниз по склону, а более извилистым путем.

4.2.2. Загрязнение

Если оставить в стороне попадание загрязняющих веществ непосредственно в русла рек, например со сточными водами, или при авариях на воде, то внимание должно быть сконцентрировано на бассейновом загрязнении глобального, регионального или локального масштаба. В этом случае на поверхность бассейна равномерно или ареалами и пятнами попадает загрязнитель, оседающий вместе с пылью или выпадающий вместе с осадками. Явление может быть однократным и катастрофическим или же, наоборот, достаточно постоянным и длительным со своим особым режимом загрязнения.

С точки зрения гидрологии возможны два вида загрязнения, отличающихся по форме взаимоотношения воды и химического вещества. Различие это очевидно, и оно диктуется степенью растворимости загрязнителя в воде. Пути попадания его в русловую сеть разные. Растворимый загрязнитель вместе с водой проникает в почву. Судьба нерастворимого загрязнителя неразрывно связана с эрозией почвы, и его смыв вместе с почвенными частицами в основном возможен только при формировании поверхностного стока.

После попадания загрязнителя на поверхность бассейна, в конечном счете, происходит его распределение между носителями загрязнения, главнейшими из которых являются вода и почва. Загрязнитель, задержанный растительным покровом, частично им воспринимается, а частично испаряется или смывается осадками на поверхность почвы. В дальнейшем загрязнитель или его производные присутствуют в пределах речного бассейна в следующих ассоциациях: в биоценозе (избирательно в различных видах), в почвенном веществе, в почвенных, подземных, озерных, болотных и текучих водах, в донных отложениях рек и водоемов, в рыхлообломочных отложениях конусов и полей выноса. Время «хранения» загрязнителя, отвечающее степени его динамичности, во всех этих вариантах колеблется в самых широких пределах — от часов до многих лет и десятилетий.

4.3. Склоновая эрозия и судьба нерастворимого загрязнителя

Загрязняющее химическое вещество, поступившее на поверхность почвы и не растворяющееся в воде, остается на поверхности и может частично проникнуть в верхний почвенный слой. Если загрязняющее вещество жидкое, то оно может проникнуть довольно глубоко в почву и адсорбироваться на поверхности почвенных частиц. Дальнейшая миграция нерастворимого загрязняющего вещества возможна практически только с перемещением почвенных частиц, другими словами, она становится совмещенной с процессом эрозии.

Введем обозначения:

H_{RO} — слой поверхностного притока воды к русловой сети;

$q = H_{RO}/\Delta t$ — интенсивность поверхностного притока;

j — суммарная интенсивность эрозии и поверхностного притока;

g — интенсивность эрозии (смыва твердого вещества почвы, включая загрязнитель);

$\zeta = u/(1-\varepsilon)$ — относительная объемная влажность РСП (отношение объема или слоя воды к объему или слою твердого вещества почвы, где u — объемная влажность почвы, ε — пористость почвы).

Суммарная интенсивность эрозии почвы с загрязнителем и поверхностного притока с учетом почвенных вод, высвобождаемых в процессе эрозии, определится следующим образом:

$$j = g(1+\varsigma) + q.$$

Будем полагать, что интенсивность эрозии пропорциональна функции угла наклона склона и нелинейной функции интенсивности поверхностного притока к русловой сети:

$$g = \chi \sin\alpha \cos\alpha f(q).$$

Коэффициент пропорциональности χ может быть назван параметром податливости почвы эрозии (параметром размываемости). В качестве подходящей нелинейной функции может быть принята следующая:

$$f(q) = q + \varphi q^2.$$

Тогда $j = \chi \sin\alpha \cos\alpha (1+\zeta)(q+\varphi q^2) + q$,
и плотность суспензии

$$\gamma = \frac{\chi \sin\alpha \cos\alpha (q+\varphi q^2)(\rho + \rho_0 \zeta) + \rho_0}{\chi \sin\alpha \cos\alpha (q+\varphi q^2)(1+\zeta) + q}.$$

Здесь φ — коэффициент нелинейности в соотношении интенсивностей эрозии и поверхностного притока к русловой сети.

Выше было описано преобразование случайного процесса интенсивности дождя в таковой поверхностного стокообразования с помощью детерминированной функции

$$q = i - f_0[1 - \exp(-i/f_0)],$$

где i — интенсивность дождя; f_0 — коэффициент фильтрации почвы, а также с учетом показательного закона распределения случайного процесса интенсивности дождя

$$\varphi(i) = (1/I)\exp(-i/I),$$

где I — средняя интенсивность дождя.

Решение приводит к очень простому результату для выражения математического ожидания интенсивности поверхностного стокобразования:

$$M(q) = I^2/(I + f_0).$$

Подобное преобразование возможно и для интенсивности эрозии. В частности, выражение для математического ожидания $M(g)$ имеет вид

$$M(g) = \chi \sin\alpha \cos\alpha \left\{ \varphi \left[2I^2 - 2f_0 I + f_0^2 + \frac{2f_0^3 I}{(f_0 + I)^2} - \frac{2f_0^3}{f_0 + I} + \frac{f_0^3}{f_0 + 2I} \right] + \frac{I^2}{I + f_0} \right\}. \quad (4.1)$$

Тогда количество оставшегося на поверхности (и у поверхности) почвы нерастворимого загрязняющего вещества в конце расчетного интервала времени Δt может быть оценено с помощью следующего уравнения:

$$h'' = (h_0'' + \Delta h'')\{1 - M(g)\Delta t/[\Delta x_1(1 - \varepsilon_1)]\}, \quad (4.2)$$

где h'' — слой нерастворимого загрязняющего вещества; h_0'' — его начальное значение; $\Delta h''$ — его поступление на поверхность почвы за расчетный интервал времени Δt; Δx_1 и ε — толщина и пористость верхнего расчетного слоя почвы; M — обозначение математического ожидания.

Учитывая значения плотности воды $\rho_0 = 1\,000$ кг/м^3, плотности вещества почвы или горной породы $\rho = 2\,650 - 2\,700$ кг/м^3, дополнительное количество воды, поступившей в суспензию при размыве почвы, а также полученное соотношение между $M(g)$, с одной стороны, и I и f_0, с другой, имеем

$$\gamma = \frac{M(g)(\rho + \zeta\rho_0) + M(q)\rho_0}{(1 + \zeta)M(g) + M(q)}, \quad (4.3)$$

где γ — плотность суспензии, кг/м^3.

Если иметь в виду, что h_1'' — слой нерастворимого загрязняющего вещества в верхнем слое почвы, то относительное загрязнение этого слоя может быть выражено следующим образом:

$$\nu_1'' = h_1''/[\Delta x_1(1-\varepsilon_1)]. \qquad (4.4)$$

Тогда для величины относительного загрязнения суспензии получим соотношение

$$\nu' = \nu_1' M(g)/[(1+\zeta)M(g) + M(q)].$$

Среди параметров уравнений (4.1)—(4.4), подлежащих оценке, выделим следующие:

1. Параметр податливости почвы эрозии χ, который может оцениваться обратным путем по результатам лабораторных экспериментов и по наблюдениям на реальных водосборах.

2. Коэффициент нелинейности эрозионной функции φ (с/м), т.е. зависимости интенсивности эрозии от интенсивности поверхностного притока к русловой сети. Оценка — по результатам наблюдений за смывом на площадках и микроводосборах при естественных дождях и искусственном дождевании.

3. Коэффициент фильтрации f_0 (м/с). Оценка — по данным лабораторных измерений на почвенных монолитах или обратным путем по величинам осадков и стока при естественных дождях или искусственном дождевании.

4. Пористость первого расчетного слоя почвы ε_1 (безразмерный параметр), оценка тривиальна.

4.4. Миграция растворимого загрязнителя вместе с водой

Растворимое загрязняющее химическое вещество вместе с водой проникает в почву. Часть вещества адсорбируется почвенными частицами. Между концентрацией раствора и адсорбционными возможностями почвы существует определенное соотношение. Кривая, отображающая такое соотношение, носит название изотермы адсорбции. Если не будет новых поступлений загрязняющего вещества, то в процессе инфильтрации талой и дождевой воды он постепенно будет вымыт из почвы и поступит в подземные воды, где и будет пребывать, постепенно истощаясь, определенное время. Участие подземных вод в переносе растворимого загрязняющего вещества растягивает процесс загрязнения и последующей реставрации на долгие годы и десятилетия.

Примем везде, что количество загрязняющего вещества определяется его слоем в снежном покрове, на поверхности почвы, в

расчетных слоях почвы (РСП), в различных ярусах подземных вод. Такая форма выражения удобна при различных подсчетах, главным образом балансовых. Введем обозначения и приведем некоторые соотношения:

h''' — слой растворимого загрязняющего вещества, м;

a — слой загрязняющего вещества в адсорбированном состоянии, м;

β — плотность загрязняющего вещества, кг/м^3;

c и c' — концентрация загрязняющего вещества в почве, кг/м^3 и кг/кг соответственно;

ν — относительная концентрация загрязняющего вещества в растворе (безразмерная величина);

μ и μ' — концентрации раствора загрязняющего вещества, кг/м^3.

$$c = h'''\beta/\Delta x;\ \ c' = h'''\beta/[\Delta x(1-\varepsilon)\rho];$$
$$\mu = h'''\beta/(H + h''');\ \ \mu' = h'''\beta/H;$$
$$\nu = h'''/H.$$

Здесь Δx — толщина расчетного слоя почвы, м; ρ — плотность почвенного вещества, кг/м^3; ε — пористость почвы (безразмерная величина); H — слой воды, м.

Кривую зависимости между концентрацией растворимого загрязняющего вещества и слоем адсорбции принято называть *изотермой адсорбции*, несмотря на то, что, приводя такие кривые, часто «забывают» указать, каким температурам эти кривые соответствуют.

Среди известных аналитических аппроксимаций изотерм адсорбции присутствуют линейная и другие функции, так же как и разные формы выражения концентрации раствора. Говоря о концентрации химического вещества в воде и изотерме адсорбции, к этим понятиям необходимо подходить с повышенной аккуратностью. Подвох заключается в неоднозначности понятия «концентрация». Существуют два распространенных варианта определения: 1) количество вещества, содержащееся в единице объема воды: $\nu_1 = V/W$; 2) то же, но в единице объема раствора: $\nu_2 = V/(W+V)$, где V и W — соответственно объемы химического вещества и воды.

Напомним, что среди известных выражений изотерм адсорбции в первую очередь обычно называют соотношения Генри

$$a = a'\nu'$$

и Ленгмюра

$$a = a'\nu'/(1+\nu),$$

которые противопоставляются друг другу как линейное и нелинейное и отвечают различным физическим моделям адсорбции. Любопытно, что «законы» Генри и Ленгмюра переходят друг в

друга при замене одного способа выражения концентрации другим:

$$a = a'\nu_2 = a'\nu_1/(1+\nu_1).$$

Составить представление, о какой концентрации идет речь в той или иной статье или монографии, чаще всего затруднительно. Для выражения изотермы используем достаточно гибкое интерполяционное выражение

$$a(\nu) = a^*(\nu/\nu^*)^n, \quad \nu \le \nu^*, \tag{4.5}$$

где $a(\nu)$ — слой адсорбции в РСП, соответствующий концентрации фильтрующегося раствора; ν^* — максимально возможная концентрация загрязняющего вещества в воде (растворимость загрязняющего вещества) при данной температуре; a^* — максимальный слой адсорбции загрязняющего вещества при данной температуре; n — показатель нелинейности изотермы адсорбции. Подразумевается обратная зависимость между величинами a^* и ν^*.

Выражение (4.5) напоминает изотерму Фрейндлиха $a(\nu) = a'\nu^n$, которую в ситуациях, подобных нашей, используют чаще всего, но критикуют за эмпиричность (будто все другие изотермы не эмпиричны!) и за то, что она не переходит в линейную форму при низких концентрациях раствора и не имеет верхнего предела. Первый недостаток вовсе не очевиден, ведь мы согласны на искажение «закона» Генри при высоких концентрациях. А линейность изотермы для малонасыщенных растворов вовсе не есть теоретически и эмпирически непреложный факт. Что же касается уравнения (4.5), то от второго, достаточно явного недостатка уравнения Фрейндлиха, оно избавлено.

Зависимость растворимости загрязняющего вещества от температуры примем линейной:

$$\nu^* = \nu_0^* + \xi\theta \quad \text{при} \quad \theta \ge 0\ ^\circ\text{C},$$

где ν_0^* — растворимость при $\theta = 0\ ^\circ$C; ξ — эмпирический коэффициент, присущий данному загрязняющему веществу; θ — температура раствора.

Зависимость a^* от температуры определим соотношением

$$a^* = a_0^*\nu_0^*/\nu^*,$$

где a_0^* — слой адсорбции при насыщенном растворе и температуре $\theta = 0\ ^\circ$C.

Таким образом, в качестве параметров физико-химической системы загрязняющее вещество — почва выступают следующие: ν_0^*, a_0^*, ξ, n.

Необратимое связывание загрязняющего вещества с веществом почвы не учитывается. Предполагается, что поправка на этот недоучет всегда может быть сделана без каких-либо затруднений.

Если адсорбат жидкий, то a^*, как и прежде, максимальный слой адсорбции, а ν^* — относительная концентрация, превышение которой не ведет к увеличению адсорбции.

На поверхность почвы поступает твердое или жидкое загрязняющее вещество.

Оно накапливается на поверхности, частично проникая в поровое пространство верхнего слоя почвы. Введем обозначения:

h''' — слой загрязняющего вещества на поверхности почвы;

$\Delta h'''$ — его поступление на поверхность за расчетный интервал времени Δt;

ν — концентрация раствора, поступающего на поверхность (отличается от нуля при загрязненных дождях или водоотдаче из загрязненного снега);

H — слой дождя или водоотдачи из снежного покрова.

Будем полагать, что вода, поступающая на поверхность почвы, превращается в насыщенный раствор до тех пор, пока загрязняющее вещество не иссякнет. Тогда

$$h''' = \max(\Delta h''' + h_0''' - \nu^* H;\ 0),$$

где h_0''' — начальное значение слоя загрязняющего вещества.

Примем, что в каждом расчетном слое почвы интенсивность адсорбции загрязняющего вещества пропорциональна толщине этого слоя Δx, некоторой функции от интенсивности фильтрации водного раствора загрязняющего вещества $\varphi(i)$ и определяется разностью $a(\nu) - a$, где a — слой адсорбции и $a(\nu)$ — равновесное количество адсорбируемого вещества при данной концентрации раствора:

$$da/dt = p\Delta x[a(\nu) - a]\varphi(i),$$

где p — показатель интенсивности адсорбции (десорбции) загрязняющего вещества в толще почвы.

Тогда слой адсорбции

$$a = a(\nu)(1 - \lambda) + a_0\lambda,$$

где a_0 — начальное значение a и

$$\lambda = \exp[-p\Delta x\Delta t f(i)].$$

Очевидно, что $\Delta a = a(\nu) - a$, при $\Delta a > 0$ наблюдается адсорбция, при $\Delta a = 0$ — равновесное состояние и при $\Delta a < 0$ — десорбция.

Рассмотрим следующие варианты $f(i)$:

1. Интенсивность адсорбции не зависит от интенсивности фильтрации воды: $f(i) = 1$. Ситуация здесь не столь проста, какой кажется на первый взгляд, так как неявно приходится предполагать условие отсутствия лимитирующего адсорбцию (десорбцию) снижения (повышения) концентрации раствора.

2. Интенсивность адсорбции пропорциональна интенсивности фильтрации воды: $f(i) = H/\Delta t$.

3. Интенсивность адсорбции пропорциональна нелинейной (степенной при $0 < r < 1$) функции от интенсивности фильтрации воды:

$$f(i) = (H/\Delta t)^r.$$

4. Интенсивность адсорбции нелинейно зависит от интенсивности фильтрации воды, но ее рост ограничен:

$$f(i) = 1 - \exp(-r'H/\Delta t).$$

Здесь r и r' — показатели нелинейности соотношения между интенсивностями процессов адсорбции — десорбции и фильтрации воды.

В алгоритмах, описывающих общий процесс загрязнения, помимо приведенных соотношений должны присутствовать уравнения, описывающие процессы кристаллизации твердого загрязняющего вещества в случае понижения температуры раствора или уменьшения адсорбционных возможностей при повышении температуры, а также попадания загрязняющего вещества в поверхностные, почвенные и подземные воды.

4.5. Перспективы изучения и моделирования процессов эрозии и бассейнового загрязнения

Дальнейшие перспективы исследований и моделирования комплексного процесса стока, эрозии и бассейнового загрязнения связаны с необходимостью достижения логической, физической, геохимической и алгоритмической целостности и относительной законченности теории и моделирующих систем.

Не менее важна процедура обобщения и нормирования параметров, т.е. информационного обеспечения моделирования процессов формирования жидкого, твердого и токсического стока.

Узким местом для становления четкой и развернутой методики моделирования является практическое отсутствие доступной информации о загрязнении речных бассейнов и стока с них. Необходимы данные о поступлении загрязняющего вещества на поверхность бассейнов, об истории его пребывания там и, наконец, о его стоке через замыкающий створ. И все это при наличии более стандартных материалов об осадках и жидком стоке.

ГЛАВА 5
ГОРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

5.1. Проблема

Горная гидрология может быть выделена в особый крупный раздел гидрологии суши из-за во многом определяющего влияния высоты местности. Склоны как главные элементы горного рельефа связаны с таким свойством территории, как ее расчлененность и в первую очередь характеризуются уклоном и экспозицией (ориентацией). В известном смысле «равнинная» гидрология может трактоваться как частный случай горной при малых высотах и уклонах. Все сказанное о гидрологии вообще в первую очередь относится и к горной гидрологии.

Итак, высота, уклон и ориентация! Все эти главные характеристики горной территории имеют как прямое, так и косвенное воздействие на гидрологические процессы и явления в горах.

Общая картина вынужденного изменения горного климата с высотой, а следовательно, и условий протекания наземной части гидрологического цикла в горах хорошо иллюстрируется моделью «стандартной атмосферы», отображающей осредненное статическое состояние атмосферы, соответствующее 45° с.ш. и представленное рядом основных ее физических характеристик в зависимости от высоты над уровнем моря (Атмосфера. Справочник. Л., 1991) (табл. 5.1).

Данные табл. 5.1 позволяют уяснить только общую закономерность, но не могут быть использованы для конкретных расчетов.

Горная гидрология может быть подразделена на две части. Первая из них касается особенностей формирования стока в горных условиях, вторая — гидрологических процессов, развивающихся почти исключительно в районах высоких уклонов. Уклон местности, в конечном счете, определяет само существование стока как такового. И если уклоны малы, то все процессы протекают спокойно. С увеличением уклона ситуация меняется. При этом открываются возможности возникновения целой серии специфических природных явлений.

Говоря об уклоне, всегда необходимо четко сознавать, какая из тригонометрических функций — синус или тангенс — имеется в виду. При малых уклонах земной поверхности это значения почти не имеет, но при больших может привести к серьезным ошибкам.

Таблица 5.1. **Стандартная атмосфера как функция высоты над уровнем моря**

Высота, м	Температура, °С	Давление воздуха, ГПа	Плотность воздуха, кг/м³
0	15,0	1 013	1,225
1 000	8,5	899	1,112
2 000	2,0	795	1,007
3 000	–4,5	701	0,909
4 000	–11,0	617	0,819
5 000	–17,5	540	0,736
6 000	–24,0	472	0,660
7 000	–30,4	411	0,590
8 000	–36,9	357	0,526
8 848	–42,4	315	0,476

5.2. Особенности формирования стока в горах

Физика процессов формирования стока и в горах, и на равнинах одна и та же. Однако в горных условиях все эти процессы в большей мере интенсифицированы и выражены более ярко. Рельеф, не считая прямого воздействия на сток через высоту местности, уклон и экспозицию склонов, оказывает влияние на климатические условия и ландшафты, которые, в свою очередь, определяют величину стока и его режим [29].

Определяющее влияние абсолютной высоты местности на климатические условия формирования стока достаточно очевидно и во многом подобно влиянию широты. Увеличение высоты обычно сопровождается падением атмосферного давления, понижением температуры и влажности воздуха, ростом прямой солнечной радиации, вероятности фазовых переходов, появлением горных, а затем высокогорных ландшафтов вплоть до круглогодичных фирновых полей. Большая абсолютная высота — это увеличение зимы и сокращение лета, это поздняя весна и ранняя осень.

Анализируя особенности влияния высоты на водный баланс горных водосборов, часто приводят разного рода показательные на первый взгляд зависимости. Но многие из них иллюстрируют преобладание бухгалтерского подхода над физическим. Например, иногда констатируется рост испарения со снежного покрова с

Таблица 5.2. **Коэффициенты испаряемости в зависимости от высоты местности**

H, м	0	500	1000	2000	3000	4000	5000	5814	6000	7000	8000	8848
K	1	1,09	1,17	1,34	1,52	1,69	1,86	2,00	2,03	2,20	2,38	2,52

увеличением высоты. Но в основном это всего лишь следствие влияния продолжительности залегания снежного покрова, а не непосредственного воздействия высоты на интенсивность процесса. Вообще-то при прочих равных условиях снижение атмосферного давления с высотой должно способствовать некоторому увеличению испаряемости. В частности именно поэтому с абсолютной высотой растет величина испарения с водной поверхности: $K = 0{,}000172H + 1$, где H — высота над уровнем моря, м. Эффект влияния высоты на отношение испаряемости на данной высоте к таковому на уровне моря иллюстрируется табл. 5.2.

Прямое воздействие на режим стока оказывает разность высот в речном бассейне, а точнее — распределение площади по высотным зонам. Увеличение диапазона высот влечет за собой рост продолжительности снеготаяния и связанного с ним половодья. Если на равнинах умеренной зоны половодье обычно длится 15—50 дней, то в горах при размахе высот в 3000—5000 м — 100—180 дней. Площадь одновременного снеготаяния, ограниченная с одной стороны фронтом, а с другой — тылом снеготаяния, с течением времени медленно ползет вверх. Фронт снеготаяния — это приблизительно положение «нулевой» изотермы, тыл — сезонная снеговая линия. Оставшиеся ниже последней отдельные ледники и снежники вносят дополнительное своеобразие в режим речного стока, продлевая половодье вплоть до наступления осенних холодов.

Первопричина влияния ориентации (экспозиции) склонов на условия формирования стока (прямые и опосредованные) — разница в количестве поступающей солнечной радиации. Последствия этого факта запечатлены в сложившейся ландшафтной структуре каждой горной территории.

Существенно различие в протекании процессов формирования стока на склонах различной экспозиции, даже если эти склоны обращены к одному и тому же водотоку. Особенно разительны контрасты склонов северной и южной ориентаций. Часто можно наблюдать картины, когда один из этих склонов покрыт лесом, а другой — луговой или степной растительностью. Явления определяющего влияния ориентации склонов сохраняют свою актуальность и при переходе к масштабам макрорельефа.

При рассмотрении процессов формирования стока часто забывают о влиянии уклона, а оно существенно, особенно в горных условиях. Очень важно, например, обратить на него внимание при совместном математическом описании переноса тепла и влаги.

Понимание принципиального влияния уклона на стоковые процессы в горах должно быть основано на трех важных, хотя вроде бы и тривиальных, фактах:

1) действительная площадь соприкосновения подстилающей поверхности с атмосферой всегда больше своей горизонтальной проекции;

2) движение водного потока в почве и рыхлообломочной горной породе осуществляется вертикально;

3) поток тепловой энергии направлен перпендикулярно поверхности склона.

Формально при $\alpha > 0°$ системы координат, удобные при описании потоков тепла и влаги, не совпадают, что должно быть учтено. В случае дискретизации среды следует четко помнить, что если Δz — толщина расчетных слоев почвы, параллельных поверхности склона и используемых в системе расчета динамики тепловой энергии, и Δx — толщина слоев в системе расчета динамики влаги, то

$$\Delta x = \Delta z / \cos \alpha.$$

Так, при $\alpha = 60°$ $\Delta x / \Delta z = 2$.

Практические гидрологические последствия вышесказанного таковы: при прочих равных условиях величина уклона земной поверхности в $1/\cos \alpha$ раз увеличивает приток тепла в снежный покров, почву или реголит, стаивание льда или снега, испарение с почвы, перехват осадков растительным покровом, начальные потери стока. Зато уменьшается и становится пренебрежительно малым поверхностное задержание. Видимо не следует напоминать, что к слою осадков все это не относится, что и влечет за собой изменения составляющих водного и теплового балансов наклонных территорий по сравнению с близкими к горизонтальным. Существуют и другие воззрения по поводу влияния уклона на сток и воднобалансовые соотношения. В свое время А.А. Соколовым и М.Н. Заславским («Об учете реальной площади водосборных бассейнов с крутыми склонами». Сборник работ по гидрологии № 1. Л., 1959) было высказано соображение о необходимости «вводить поправки к показаниям дождемеров при сопоставлении элементов водного баланса на стоковых площадках с различными уклонами» в соответствии с выражением $H(\alpha) = H(0) \cdot \cos \alpha$, где $H(\alpha)$ — действительный слой осадков на поверхности при угле наклона α; $H(0)$ — слой осадков, зарегистрированный дождемером. Уменьшение именно осадков, а не изменение других элементов водного баланса, неизбежно приводит к неверной трактовке ситуации. А вот другое утверждение, принадлежащее М.И. Львовичу (Реки СССР. М., 1971): «Исходя из теоретических предпосылок, было доказано, что уклон местности почти не влияет на сток, так как не является фактором инфильтрации почвенного

покрова, в тесной связи с которой находится склоновый сток». Это не совсем верно даже для случая формирования поверхностного стока, действительно связанного с инфильтрационной способностью почвы, но в общем случае — это ложный вывод.

Следует также иметь в виду, что глубина промачивания почвы $h(0)$ (измеряемая по вертикали) будет одинаковой при любых уклонах, зато толщина промоченного слоя $h(\alpha)$ (измеряемая перпендикулярно поверхности склона) будет уменьшаться с увеличением уклона:

$$h(\alpha) = h(0) \cdot \cos \alpha.$$

Для расчета средних скоростей течения воды при установившемся движении чаще других используется формула Шези — Маннинга

$$v = KH^{0,67}(\sin \alpha)^{\psi},$$

где K — коэффициент, учитывающий сопротивление движению потока; H — средняя по живому сечению глубина потока; α — угол наклона дна русла; $\psi = 0,5$.

Видимо диапазон изменения уклонов и сами уклоны в эмпирическом материале, которым располагал Шези, были настолько небольшими, что по-настоящему вопрос о зависимости скорости течения от уклона так и не был поставлен. Для реальных горных водотоков $\psi = 0,17$. Именно такое, более сильное, чем это предполагалось в привычном мире формулы Шези, влияние уклона на скорость течения и время добегания или концентрации должно приниматься во внимание.

5.3. Пространственная интерполяция метеорологических величин в горных условиях

Первое, с чем приходится сталкиваться гидрологу-аналитику в условиях горной страны, — это пестрота распределения осадков, что немедленно влечет за собой мозаичность почвенно-растительного покрова и неоднородность испарения и стока. Поэтому проблема осадков, на первый взгляд являясь формально метеорологической, в не меньшей степени приобретает исключительную значимость для гидрологии. Среди многих важных вопросов этой проблемы следует выделить три основных:

1) о необходимости и условной достаточности числа метеорологических станций и осадкомерных пунктов и их не всегда оправданной избирательности в плане расположения относительно элементов макро- и мезорельефа;

2) об ошибках наблюдений с помощью осадкомеров и необходимости введения существенных поправок, особенно на выдувание твердых осадков;

3) о пространственной интерполяции осадков.

Первый вопрос связан с социологическими и экономическими аспектами и должен приниматься во внимание как неизбежный факт, с которым в разных государствах приходится считаться в плане или понимания, или сожаления. Увы, сейчас в мире насчитывается больше закрытых высокогорных метеорологических станций, чем вновь открытых.

Второй вопрос определяется методологией внесения поправок. Но действительно принципиальное решение здесь связано с созданием измерителей осадков нового поколения, хотя «новая жизнь» в гидрометеорологии и в этом случае начнется не сразу, а лишь после многих лет параллельной работы старой и новой аппаратуры.

Третий вопрос — предмет профессионального мастерства и предприимчивости гидрологов и метеорологов. Естественно, что задача удачной интерполяции в горных условиях касается не только осадков, но и других метеорологических элементов.

При любом гидрологическом анализе, при расчетах и моделировании всегда требуется надежная информация о метеорологических элементах. И чем подробнее эта информация, тем лучше. Поэтому принципиально важное значение именно для гидрологии приобретает проблема пространственной интерполяции метеорологических элементов.

Четко различаются две самостоятельные, хотя и имеющие определенную общность, задачи:

1) интерполяция статистических параметров метеорологических элементов (средних многолетних годовых или месячных величин, квантилей кривых распределения и т.п.) по территории (классическая задача климатологии), сводящаяся к построению графических или цифровых карт их изолиний различного масштаба;

2) интерполяция самих метеорологических элементов за отдельные даты или другие интервалы времени.

Первая задача сводится к назначению в интересующих нас точках территории статистических параметров, вторая — конкретных значений осадков, температуры, влажности воздуха и других метеорологических элементов (часовых, суточных, месячных и т.п.).

Вторая задача часто решается напрямую способом обычной линейной интерполяции. Но в горных условиях этот путь практически неприемлем, разве только для утопической территории, сплошь усыпанной метеорологическими станциями. В общем случае целесообразной процедурой представляется нормирование

переменной по подходящей климатической характеристике. Для существенно положительных величин достаточно умножение на соответствующий нормирующий множитель (например, на обратное значение средней многолетней величины годовых осадков, температуры и влажности воздуха и т. п.).

Операция нормирования сводит вторую задачу к решению первой, тем более что остается необходимость перехода от интерполированных нормированных величин путем обратной операции к обычным. Сама же интерполяция достаточно строго осуществляется в рамках триангуляции — разделения земной поверхности на систему прилегающих друг к другу треугольников, в углах которых находятся метеорологические станции. Тогда для интересующей нас точки внутри любого треугольника значение метеорологического элемента определяется как среднее, взвешенное между тремя известными значениями.

В конечном счете определение климатических величин температуры и влажности воздуха в любых точках территории особых затруднений почти не вызывает. По-настоящему сложной является проблема исследования пространственного распределения осадков. Для горных территорий эта проблема продолжает оставаться актуальной и в принципе не решенной. Некоторые успешные реализации для отдельных районов вряд ли можно считать окончательными, к тому же они обычно основаны на привлечении разного рода местных показателей, что лишает все построения необходимой общности. В качестве таких показателей могут быть названы высота над уровнем моря или расстояния до важнейших в данном районе орографических точек или линий (берег моря, ось хребта).

Высота метеорологической станции — наиболее часто используемый показатель. Зависимости характеристик осадков, например средней многолетней годовой суммы, от высоты даже в пределах относительно небольших горных бассейнов (10—1 000 км^2) иногда достаточно тесны и выразительны, а иногда буквально «рассыпаются». В них заложена некоторая неопределенность. Вряд ли следствием анализа таких зависимостей может служить утверждение: чем больше высота, тем больше осадки. Часто это просто не соответствует действительности. Но такие зависимости могут быть очень полезны, если к двухмерному пространству «высота — осадки» относиться как к интерполяционно-экстраполяционной плоскости, на которой можно строить целую климатическую картину из кривых линий, в том числе и гипотетических, но не противоречащих данным наблюдений. Такие построения иногда можно отнести к области, пограничной между наукой и искусством.

В качестве целесообразного и менее субъективного подхода к решению задачи можно предложить идею создания некоторых

подходящих «орографических мер», характеризующих местоположение осадкомерного пункта или любой интересующей нас точки на местности, которые должны иметь достаточно тесную однозначную связь с годовой (сезонной, месячной) суммой осадков. С этой целью предварительно ставится диагноз взаимодействия влагоносных воздушных масс с горной системой и выявляется климатоформирующее направление их вторжения на горную территорию.

Возможны различные схемы конструирования «интерполяционных орографических моделей осадков» (ИОМО), но их всех объединяют установленные закономерности трансформации полей осадков над горами — эффекты предвосхождения, перелива и экранирования, увеличение осадков на наветренных склонах и снижение на подветренных, уменьшение их над межгорными котловинами, широкими долинами и озерами. При этом особую роль играют вынужденный подъем воздушных масс, их путешествие по лабиринту долин и ущелий, включая разного рода отклонения и даже движения вспять, попадание в тупики перед труднопреодолимыми преградами.

В качестве линии начала отсчета выбирается подходящая изогипса или изогиета, огибающая горную страну с наветренной стороны, которую будем считать базовой изолинией. На рассматриваемой горной территории обозначаются две группы точек с фиксированными высотами над уровнем моря и местоположением. Первая группа соответствует метеорологическим станциям и постам, вторая — точкам на местности (назовем их расчетными или репрезентативными (РТ)), значение сумм осадков в которых нам необходимо, например, в целях моделирования стока. Если вторая группа точек определена самой постановкой задачи, то первая служит для оценки параметров ИОМО.

Образно говоря, предлагается как бы пройти вместе с влагонесущими воздушными потоками через горную систему к интересующей нас точке.

Приведем примеры возможных характеристик, из которых как из элементов могут быть сложены подходящие комлексные орографические меры:

- высота РТ над уровнем моря или базовой изогипсы, широко используемый в гидрологии и метеорологии аргумент, h;
- средняя высота местности $\bar{h}_R$ в круге радиусом R и с РТ, использованная Солтером еще в 1918 г. при $R = 8$ км (Р. Г. Барри. Погода и климат в горах. Л., 1984);
- разница Δh_R между максимальной высотой и высотой РТ, находящейся в центре круга радиусом R, известен вариант при $R = 8$ км (W. C. Spreen, 1947);
- превышения Δh между концами прямых отрезков ломаной линии.

Характеристики расстояния:

• кратчайшее расстояние L_1 между РТ и базовой изолинией;

• длина гидрографической линии (расстояние между РТ и базовой изолинией по последовательной системе тальвегов) L_2;

• длина прямой между РТ и точкой пересечения гидрографической линии с базовой изолинией L_3.

Характеристики направления:

• азимут направления движения влагоносных воздушных масс A_0;

• угол между прямой линией и направлением движения влагоносных воздушных масс α.

Характеристики открытости (доступности влагоносным воздушным массам):

• центральный угол $\alpha_{\Delta h}$ сектора круга радиусом R с центром в РТ, в пределах которого отсутствуют превышения над РТ более заданной величины Δh (известен вариант — $R = 32$ км, $\Delta h = 300$ м, W.C.Spreen, 1947);

• относительная величина (по отношению к 180°) угла «просвета» β между двумя касательными, проведенными из РТ к изогипсе, соответствующей высоте РТ плюс некоторое превышение $\Delta h \geq 0$ и направленными в сторону базовой изолинии; при этом в пределах зоны открытости должны отсутствовать «острова», окруженные той же избранной изолинией.

Из перечисленных или других подходящих элементов могут быть составлены целесообразные орографические меры, которые могут быть апробированы для какой-либо конкретной горной территории, а затем для нее же использованы при интерполяции осадков.

Поставленной задаче соответствует свой оптимальный масштаб топографической карты (электронной ГИС) со своим уровнем генерализации. Возможно, это масштаб 1:500 000.

Число исследуемых орографических мер может быть размножено, но действительно подходящих для нашей задачи их должно быть немного.

5.4. Ледники и ледниковый сток

5.4.1. Основные понятия и определения

Если обратиться к наиболее распространенному определению понятия «ледник», то это «масса льда преимущественно атмосферного происхождения, испытывающая вязко-пластичное течение под воздействием силы тяжести и принявшая форму потока, системы потоков, купола (щита) или плавучей плиты» [8].

Это вполне понятная, хотя в основном лишь констатирующая дефиниция. Но поскольку далее в этом же издании, например, указано, что фирновый бассейн — часть горного ледника, т.е. территория, отнюдь не занятая массой льда, то очевидно, что приведенное определение содержит в себе некоторое внутреннее противоречие. Если в дополнение к этому обратить внимание на некоторую неопределенность словосочетания «атмосферное происхождение», смысл которого конечно очевиден, но только в силу того, что мы заранее кое-что о ледниках уже знаем, то, возможно, целесообразно сформулировать несколько иной вариант определения. Чуть ниже он будет приведен.

Поверхность суши разбита на систему речных бассейнов со своей сложной иерархической структурой. И в каждом бассейне, большом и малом, совершается общее великое движение воды, которое мы называем наземной частью гидрологического цикла. В умеренных широтах определенное разнообразие в этот процесс вносят фазовые превращения воды — переход ее из жидкого состояния в твердое и обратно. Выпадение снега, снеготаяние и ледовые явления на реках и озерах со всеми своими проблемами — доказательство этому. Что же можно сказать о высоких широтах и высокогорье, где основное фазовое состояние воды твердое? В виде снега и льда она и здесь выполняет свою гидрологическую и экзогенную геологическую миссии. Но вместо речных бассейнов тут функционируют ледниковые.

Ледниковый бассейн — часть поверхностного слоя земной коры:

- оформившаяся как единое природное целое в процессе функционирования наземной части гидрологического цикла за достаточно длительный период геологического времени и поэтому унаследованная от климатических условий прошлого;
- связанная с системой форм рельефа и ограниченная водораздельной линией (эти две первые части определения, общие с таковыми для речного бассейна);
- являющаяся, в силу особых климатических условий (низкие температуры и достаточность осадков), определяемых совместным влиянием широты и высоты над уровнем моря, местом динамики воды, находящейся в основном в твердом фазовом состоянии, и ее уплотнения в последовательном переходе снега в фирн, а фирна в лед;
- разделяющаяся по высоте на две зоны — верхнюю (питания, накопления) и нижнюю (абляции);
- имеющая разработанные пути (поверхностные, подземные, под- и внутриледниковые) движения талой воды за пределы ледникового бассейна;
- ограниченная концами ледниковых языков и поэтому из-за наступания — отступания последних меняющая свою площадь в зависимости от динамики климата.

Ледник — основной элемент ледникового бассейна, представляющий собой скопление льда, находящегося в движении и принимающего в зависимости от морфологических особенностей земной поверхности различные специфические формы.

Если сравнить определения речного и ледникового бассейнов, то нетрудно увидеть удивительное сочетание сходства и различия. Природа и на этот раз демонстрирует нам замечательный пример совмещения единства и разнообразия. Таким образом, будем воспринимать ледники вместе с прилегающими к ним снежными и фирновыми полями, лавиносборами, мореным сопровождением.

Очень важным особенно при разного рода расчетах и моделировании является подразделение ледников на две группы:

1) *теплые* (умеренные, изотермические) *ледники*, температура льда в которых ниже деятельного слоя (активного, испытывающего сезонные колебания температуры) постоянна и близка к температуре плавления льда;

2) *холодные* (полярные) *ледники*, имеющие постоянную отрицательную температуру льда ниже деятельного слоя (некоторые холодные ледники, особо большой мощности, могут иметь в придонном слое нулевую температуру).

Разнообразие морфологических типов ледников привело к созданию развернутых классификаций, иногда в некоторых своих деталях и не всегда оправданных. К последним можно отнести многие промежуточные варианты и разного рода усложнения. Но выделение ряда характерных типов вполне оправданно и даже неизбежно.

Первая группа, связанная с ***покровным оледенением***:

1. *Ледниковые щиты* — плоские ледники с впадинами и куполовидными возвышениями, большой площади и мощности. Три самых знаменитых щита:

Восточной Антарктиды, площадь 9,86 млн км^2, средняя толщина по разным оценкам 2 100—2 600 м, максимальная 4 800 м, залегает на приподнятом над океаном плато;

Западной Антарктиды, площадь 1,81 млн км^2, средняя толщина около 1 100 м, объединяет архипелаг горных островов;

Гренландский, площадь 1,70 млн км^2, средняя толщина 1 700 м, почти полностью покрывает одноименный, крупнейший в мире остров.

Остальные типы ледников первой группы могут трактоваться как элементы ледниковых щитов.

2. *Шельфовые ледники*, как правило, плавучие, иногда достигающие дна, имеющие форму плиты, ограниченной со стороны моря обрывом (барьером). Практически все сосредоточены в Антарктиде, где занимают площадь около 1,5 млн км^2. Самый известный и крупный — шельфовый ледник Росса (525 тыс. км^2) с его знаменитым одноименным барьером. Поэтому их можно интерпретиро-

вать как своего рода «сток» воды в твердой фазе, временно законсервированный близ области своего формирования. Шельфовые ледники порождают самые гигантские айсберги (до 100 км длиной и более).

3. *Выводные ледники* — ледники разгрузки конкретной части покровных ледников. Отличаются относительно высокой скоростью движения. Заканчиваются на предгорной равнине, морском побережье или в море. Особо широко распространены в Антарктиде и Гренландии. Самый крупный выводной ледник — ледник Ламберта в индийском (по названию океана) секторе Восточной Антарктиды длиной 470 км и шириной фронта около 100 км.

4. *Предгорные ледники* — обширные ледниковые поля у подножия горных хребтов, образовавшиеся при слиянии групп долинных ледников при выходе на равнину. Классический пример — ледник Маласпина, питаемый громадным ледником Сьюард и его соседями (горы Святого Ильи). Протяженность фронта ледника Маласпина вдоль морского побережья (залив Аляска) — 65 км, длина (без питающих ледников) 45 км, площадь 2,2 тыс. км^2, средняя толщина 610 м.

Вторая группа — ***горные ледники***:

1. *Долинные* — ледники, расположенные, как это и следует из названия, в горных долинах, а их фирновые поля — в чашеобразных расширениях в их верховьях; иногда выделяют дендритовые ледники, состоящие из ветвящихся систем главных ледников и их притоков.

2. *Каровые* — небольшие ледники, залегающие в карах (цирках) — чашеобразных углублениях привершинной части горных хребтов, как правило, ограниченные сверху крутыми и обрывистыми скалистыми склонами.

3. *Висячие* — небольшие ледники, залегающие во впадинах в верхних частях крутых склонов и действительно нависающие над нижележащей долиной. Часто порождают обвалы льда.

4. *Вершинные* — ледники, покрывающие отдельные горные вершины (конические, плоские) или вулканы (ледники барранкосов — эрозионных борозд на вулканических склонах или ледники кальдер — вулканических депрессий, включающих в себя кратер или группу кратеров).

Введены в обиход также некоторые частные классификации, связанные с рядом дополнительных деталей. Часть из них имеет наименование географического района или горной системы, где они наиболее распространены, например:

1. *Гималайский тип* — дендритовые ледники, заполняющие продольные долины между двумя параллельными хребтами.

2. *Туркестанский тип* (он же куньлуньский или музтагский) — долинные ледники, лишенные фирновых бассейнов и питание

которых осуществляется за счет схода снежных лавин и обвалов висячих ледников.

Говоря о геологической и геоморфологической деятельности ледников, следует отметить главное — превращение V-образных долин в U-образные троги. Под последними понимаются горные долины, выпаханные и преобразованные ледниками.

Теперь имеет смысл кратко перечислить ряд специфических образований в ледниковых бассейнах и на ледниках.

Фирновые поля занимают территорию верхней части ледникового бассейна, где, как и следует из названия, залегают массы фирна (переходной стадии между снегом и глетчерным льдом, имеющей плотность 450—800 кг/м^3 и возникающей при уплотнении снежной толщи под действием собственной тяжести и перемежающихся процессов таяния-замерзания). Находятся выше границы питания ледника (линии, разделяющей области с положительным и отрицательным балансом массы). Вдоль верхних краев фирновых полей обычно протягивается *бергшрунд* — очень широкая и глубокая трещина, возникающая при разрыве фирновой толщи из-за течения льда в ее основании и отделяющая подвижную часть поля от неподвижной, примерзшей к обрывистым скальным бортам цирков.

Язык ледника — относительно узкая и длинная часть горного ледника, спускающаяся вниз по долине и целиком находящаяся в зоне абляции.

Нунатаки — изолированные скалистые поднятия над поверхностью ледникового щита. Название используется и для горных ледников. Эскимосское слово, перешедшее в научную литературу.

Морены — массы обломочной горной породы (от суглинков до глыб), переносимые и откладываемые ледниками. Движущиеся (влекомые) морены подразделяются на поверхностные (боковые, срединные и фронтальные), внутренние и придонные, отложенные (оставленные ледником после его отступания) морены различаются как основные (донные), образующиеся под ледником и поэтому очень плотные, и абляционные, более рыхлые. Из отложенных следует особо выделить конечные морены, обычно очень мощные и которые чаще всего необходимо преодолеть, поднимаясь на ледник.

Ледопады — сильно разбитые на отдельные глыбы части ледников, приуроченные к особо крутым участкам ледникового ложа; являются местом образования сераков.

Внутриледниковые каналы, полости и водоемы — разветвленная система туннелей, пещер и более мелких элементов дренажной сети, заполненных частично или полностью водой, часто находящейся под значительным давлением, иногда даже превышающим 1 000 кПа. Потрясает пример ледника Стивенс (юго—юго-восточный склон горы Рейнир в Каскадных горах), оказав-

шийся полым на 0,1 часть своего объема (наибольшая полость 76×27×7,6 м).

Ледниковые трещины — разрывы в леднике, связанные с деформациями растяжений, возникающими в процессе его движения. Различаются следующие виды трещин — поперечные (возникающие под уступами и перегибами ложа), продольные (являющиеся следствием выхода ледника из узкого места в более широкое), диагональные (из-за различия скоростей движения льда в осевой и периферийной частях ледника). Длина трещин может исчисляться многими сотнями метров, ширина от единиц до нескольких десятков метров, глубина редко превышает 50 м.

Элементы абляционного мезорельефа поверхности ледника:

• *ледниковые воронки* — округлые впадины с пологими откосами диаметром 40—80 м, реже до 200 м, глубиной до 15—20 м встречаются на участках ледникового языка вдали от трещин, иногда имеют на дне ледниковые мельницы;

• *ледниковые колодцы* — вертикальные цилиндрические образования в теле ледника диаметром 1—2 м, образующиеся у трещин, но сохраняющиеся после их исчезновения при смыкании их стенок;

• *ледниковые столы* (*грибы*) — валуны или глыбы горной породы на ледяном пьедестале (высотой 1,0—1,5 м), возвышающиеся над поверхностью ледника (камень защищает лед от таяния под воздействием прямой солнечной радиации);

• «*муравьиные кучи*» — куполовидные или конусовидные возвышения на ледниковом языке, прикрытые обломочным или землистым чехлом (обычно высотой 1—2 м, редко до 25 м); образуются в результате более быстрого стаивания чистого льда вокруг площади, заваленной мореным материалом;

• *сераки* — зазубренные пики и шпили, остроконечные гребни, иглоподобные башни, образующиеся при неравномерном протаивании в местах, где ледник разламывается, пересекая крутой уступ (например, на ледопаде), и превращается в расколотую ледяную массу;

• *снега и льды кающихся* — остроконечные наклонные зубцы на фирновой или ледяной поверхности, напоминающие коленопреклоненные фигуры кающихся грешников (оттуда и название), возникающие при большой сухости воздуха и избирательном таянии поверхностей, перпендикулярных направлению прихода прямой солнечной радиации, на участках, усеянных редкой галькой или щебнем; самые крупные образования такого типа, достигающие 6-метровой высоты, встречаются в Андах Южной Америки.

Элементы абляционного микрорельефа поверхности ледника (коры таяния):

• *ледяные кружева* — тонкие горизонтальные пластины льда с сильно изрезанными краями, поддерживаемые вертикальными ледяными столбиками;

• *ледниковые стаканы* — вертикальные цилиндрические углубления диаметром 3—5 см и глубиной до 40 см, образовавшиеся за счет нагревания солнцем темных пылеватых включений;

• *ледяные соты* — поверхностный слой ледника, сплошь изъеденный ледниковыми стаканами.

5.4.2. Ледники на поверхности суши

В целом на земной суше ледниками покрыта площадь около 15 млн км^2*. Абсолютное и подавляющее первенство естественно остается за Антарктидой. Приближенная картина распределения оледенения в мире дана в табл. 5.3.

Следует отметить, что ледники, находящиеся вне территорий Антарктиды и Гренландии и составляющие всего 3,8 % от их общей площади, играют громадную роль в жизни людей высокогорья.

Ниже для ряда территорий, имеющих существенное оледенение, приведены такие характерные величины, как суммарная площадь ледников (км^2), объем льда (км^3), средняя толщина ле-

Таблица 5.3. **Оледенение суши**

Материки	Площадь	
	млн км^2	%
Антарктида (с островами, но без плавучих шельфовых ледников)	12,52	84,1
Гренландия	1,80	12,1
Евразия	0,23	1,5
Канадский Арктический архипелаг	0,15	1,0
Северная Америка (без Гренландии и Канадского Арктического архипелага)	0,15	1,0
Южная Америка (с Огненной Землей)	0,03	0,2
Остальное	0,01	0,1
Итого	14,89	100

Примечание. В литературе можно обнаружить и несколько другие цифры. Помимо просто разницы в оценках иногда к ледникам Антарктиды причисляют 1,54 млн км^2 плавучих шельфовых ледников, находящихся за пределами суши.

* Основная информация об оледенении суши взята из Гляциологического словаря (М., 1984) и книги Л.Д.Долгушина и Г.Б.Осиповой «Ледники» (М., 1989).

дяного покрова (м) (если в использованных источниках были приведены объемы запасов воды, то последние пересчитаны в объемы льда при принятой плотности последнего 870 кг/м^3). Для горных ледников дополнительно указаны основные реки, питаемые талыми ледниковыми водами с этих территорий.

Покровное оледенение на островах

1. Исландия, ледник Ванта-Йокуль (занимающий 72,4 % площади оледенения острова): 8 538 км^2, 3 520 км^3, 412 м (максимальная толщина 1 036 м).
2. Шпицберген (в целом): 34 854 км^2, 8 670 км^3, 249 м; Восточное и Южное ледяные поля острова Северо-Восточная Земля: 7 920 км^2, 2 870 км^3, 362 м; Западное ледяное поле того же острова: 2 880 км^2, 860 км^3, 299 м.
3. Новая Земля: 23 645 км^2, 9 310 км^3, 393 м.
4. Земля Франца Иосифа: 13 735 км^2, 2 414 км^3, 176 м.
5. Северная земля: 18 325 км^2, 5 400 км^3, 295 м.
6. Остров Аксель-Хейберг (Канадский Арктический архипелаг): 11 734 км^2, 3 222 км^3, 275 м.

Горное оледенение

1. Большой Кавказ: 1 424 км^2, 97 км^3, 68 м; Кубань, Кума, Терек, Сулак, Самур, Кура.
2. Сунтар-Хаята: 202 км^2, 14 км^3, 69 м; Алдан, Индигирка, Охота, Кухтуй, Ульбея.
3. Алтай: 1 750 км^2, 97 км^3, 55 м; Иртыш, Катунь.
4. Тянь-Шань: 16 507 км^2, 1 771 км^3, 107 м; Сырдарья, Таласс, Чу, Или, Тарим.
5. Памир: 9 750 км^2, 966 км^3, 99 м; Вахш, Пяндж, Тарим.
6. Гиндукуш и Хиндурадж: 5 900 км^2, 483 км^3, 82 м; Пяндж, Инд.
7. Куньлунь: 11 640 км^2, 874 км^3, 75 м; Тарим, бессточные котловины Внутреннего Тибета, Чанцзян (Янцзы), Хуанхэ.
8. Каракорум: 15 400 км^2, 3 035 км^3, 197 м; Инд, Тарим.
9. Гималаи: 33 200 км^2, 6 640 км^3, 200 м; Инд, Ганг, Брахмапутра.
10. Южные Новозеландские Альпы: 782 км^2, 70 км^3, 90 м; Клута, Уаитака и другие небольшие реки, впадающие в Тасманово море и Тихий океан.

В следующей сводке крупнейших ледников мира указаны их длины и площади, а также последовательности рек, по которым вода из каждого ледника попадает в конце концов в большие реки, которые все знают или, по крайней мере, должны знать.

Европа

Большой Кавказ: Безенги, 18 км, 36,2 км^2; Черек-Безенгийский, Баксан, Малка, Терек.

Альпы: Большой Алечский, 25 км, 86,8 км^2; Масса, Рона.

Азия

Тянь-Шань: Южный Иныльчек, 61 км, 567 км^2; Иныльчек, Сарыджаз, Аксу, Тарим, Тугбельчи, 36 км, 314 км^2; Музарт, Тарим.

Памир: Федченко, 77 км, 650 км^2; Сельдара, Муксу, Сурхоб, Вахш, Амударья.

Куньлунь: большая группа ледников массива Люшишань (7 160 м), сведений о которых не найдено (наиболее длинные из них близки к 30 км);

ледники северного склона: Юрункаш, Хотан, Тарим; ледники южного склона: бессточная впадина Аксайчин с озерами Аксайчинкель и Лигтен (Внутренний Тибет).

Каракорум: Сиачен, 76 км, 750 км^2; Нубра, Шайок, Инд.

Биафо, 68 км, 420 км^2; Бральду, Инд.

Балторо, 62 км, 750 км^2; Бральду, Инд.

Батура, 59 км, 285 км^2; Хунза, Инд.

Хиспар, 52 км, 580 км^2; Хунза, Инд.

Гиндукуш: Тирич, 30 км, 170 км^2; Аркари, Мастудж, Читрал, Кунар, Кабул, Инд.

Хиндурадж: Чиантар, 32 км, 260 км^2; Ярхун, Мастудж, Читрал, Кунар, Кабул, Инд.

Гималаи: Ганготри, 32 км, 300 км^2; Бхагиратхи, Ганг.

Зему, 31 км, 130 км^2; Зему-чу, Тиста, Брахмапутра.

Северная Америка

Чугач: Беринга, 203 км, 5 800 км^2; залив Аляска.

Колумбия, 68 км, 1370 км^2; залив Колумбия-Бэй.

Врангель: Набесна, 87 км, 819 км^2; Набесна, Танака, Юкон.

Аляскинский: Кахилтна, 76 км, 580 км^2; Суситна, залив Кука.

Святого Ильи: Хаббард, 115 км, 20 000 км^2; залив Якутат.

Сьюард-Маласпина, 113 км, 45 000 км^2; залив Аляска.

Каскавуиш, 75 км, ...; Каскавуиш, бифуркация:

1) Алсек, залив Драй-Бэй;

2) озеро Клуэйн, Уайт-Ривер, Юкон.

Читина, 88 км, 200 км^2; Читина, Коппер-Ривер, залив Аляска.

Клутлан, 88 км, 400 км^2; Женерс, Уайт-Ривер, Юкон.

Логан, 80 км, ...; Читина, Копер-Ривер, залив Аляска.

Береговой: Таку, 53 км, 596 км^2; Таку, пролив Стивенс.

Южная Америка

Северное Патагонское плато: Сан-Тадео, 57 км, 460 км^2; залив Пеньяс.

Стеффен, 50 км, 200 км^2; фьорд Бейкер.

Сан-Рафаэль, 45 км, 140 км^2; фьорд Элефантес.

Южное Патагонское плато: Упсала, 60 км, 595 км^2; озеро Лаго-Архентино, Санта-Крус.

Новая Зеландия

Южные Альпы: Тасмана, 29 км, 157 км^2; озеро Пукаки, Уаитаки.

5.4.3. Движение ледников

Движение ледников возможно основное, даже фундаментальное, их свойство, позволяющее выполнять функции, предназначенные им на Земле. Но представьте себе на мгновение, что лед не обладал бы свойством текучести. Картину последствий этого факта описал Артур Холмс, один из самых выдающихся геологов XX в.: «Почти вся масса воды океанов оказалась бы заключенной в гигантских ледяных полях, расположенных вокруг полюсов и обладающих огромной мощностью. Территории тропического пояса были бы песчаными и каменистыми пустынями, а дно океанов — обширной соляной равниной. Жизнь могла бы сохраниться лишь вокруг кромки ледяных полей и в редких оазисах, питаемых ювенильными водами».

Но на наше счастье ледники движутся, их нормальная скорость колеблется где-то в пределах 0,001—0,010 мм/с, а во время катастрофических подвижек их скорость увеличивается на один-два порядка и составляет в этом случае один и несколько миллиметров в секунду. И эта, на первый взгляд жалкая, скорость спасает мир и человечество!

Нормальное движение. Принято считать, что движение ледников складывается из двух составляющих — за счет вязко-пластичного течения и скольжения ледника по своему ложу. Само движение обеспечивает перенос ледяной массы из области накопления в область абляции. Максимальный расход этой ледовой реки наблюдается на границе питания, разделяющей две названные области.

Трудно, конечно, воспринимать скорости движения ледников, исчисляемые долями миллиметра в секунду, но маленькая табличка сравнения при этом будет полезной:

0,001 мм/с → 0,0864 м/сут → 31,5 м/год;
0,010 мм/с →0,864 м/сут → 315 м/год;
0,100 мм/с →8,64 м/сут → 3,15 км/год;
1,000 мм/с →86,4 м/сут → 31,5 км/год.

На ледопадах при нормальном режиме наблюдаются скорости 200—300 м/год (0,0063—0,0095 мм/с). Приведенные цифры соответствуют поверхностной скорости, да еще на «стрежне» ледового потока. К берегам и дну ледяной реки (если нет скольжения) скорости течения стремятся к нулю. Сильное дополнительное сопро-

тивление движению происходит из-за напряжений, возникающих на периферии основного потока льда между последним и «застойными» зонами в местах расширений ледникового языка после предшествующих и перед последующими сужениями. Это эффект воздействия «третьего измерения». Ледник при этом деформируется и растрескивается.

Расчеты нормального течения ледников обычно базируются на применении так называемого «закона» Глена. По сути дела, это перенесенная на гляциологическую почву известная реологическая (реология — общефизическая наука о течении вещества) модель аномально вязкого тела со степенным законом (нелинейная кривая зависимости скорости деформации от напряжения, проходящая через начало координат):

$dv/dy = A\tau^n$ (форма «закона» Глена), $n = 1/m$, $A = (1/\lambda)^{1/m}$, $\tau = \lambda(dv/dy)^m$ (форма модели степенной жидкости), $m = 1/n$, $\lambda = (1/A)^{1/n}$.

Здесь v — скорость, м/с; dv/dy — скорость деформации, $с^{-1}$; y — расстояние от ледникового ложа, измеряемое перпендикулярно поверхности ледника, имеющей угол наклона α, м; τ — напряжение (давление), Па (Па = Н/м^2); n и m — безразмерные показатели; A и λ — коэффициенты, имеющие соответственно единицы измерения: (Па · с)$^{-1}$; Па · с^m.

Коэффициенты A в «законе» Глена и λ в альтернативном выражении зависят от температуры льда; при 0 °С коэффициент A минимален, а λ максимален, с падением температуры они изменяются, и соответственно уменьшается скорость (при –30 °С она меньше «нулевого» варианта приблизительно в 100 раз). Другими словами, при очень сильных морозах ледники пребывают в оцепеневшем состоянии.

В реологии широко известна модель пластической жидкости Бингама:

$$\tau - \tau_0 = \mu(dv/dy),$$

где μ — коэффициент бингамовой вязкости пластического течения; τ_0 — начальное напряжение сдвига, которое следует приложить для того, чтобы началась деформация.

Если $\tau \succ \tau_0$, то вещество ведет себя как обычная ньютонова жидкость при напряжениях сдвига $\tau - \tau_0$. Возможно, что более подходящей моделью для течения льда может оказаться следующая:

$$\tau - \tau_0 = \lambda(dv/dy/)^m \text{ или } dv/dy = A(\tau - \tau_0)^n.$$

Это косвенно подтверждает график «напряжение — скорость деформации» для закона Глена, помещенный в гляциологическом словаре (с. 374), где его кривая явно не проходит через начало координат, что следовало бы из его уравнения. Если же полагать,

что для льда $\tau_0 = 0$, то термин «вязко-пластическое течение» возможно следовало бы заменить на «аномально вязкое неньютоново (нелинейное, степенное)».

Обратимся теперь к сложному противоречивому вопросу о скольжении ледника по его ложу. Этот вопрос сформулирован гляциологами в достаточно острой форме:

- главная цель — обнаружить и понять процессы, происходящие на ледниковом ложе;
- создание адекватной теории скольжения — основная нерешенная проблема физики ледников.

В рамках этого одного из самых «темных» вопросов гляциологии высказаны следующие положения:

- если на контакте ледника и его ложа температура ниже точки замерзания, то скольжение места не имеет;
- на скорость скольжения влияет вода, присутствующая на ложе ледника.

Последнее соображение существует и в более крайней форме: вода, находящаяся между соприкасающимися поверхностями ледника и его ложа и находящаяся под очень высоким давлением, отрывает ледник от ложа.

Попутно обсуждается вопрос об источниках воды и путях ее попадания на ледниковое ложе. Речь идет о поверхностной талой и дождевой воде, проникающей по каналам в коренных породах ложа и в теле ледника, а также через ледяную толщу по прожилкам между ледяными зернами. Обсуждается и возможность появления воды за счет теплоты трения и деформаций.

Играет ли вода ту большую роль в осуществлении скольжения ледника по ложу, которую ей склонны приписывать? Все-таки трудно предположить проникновение воды на всю поверхность контакта ледника и ложа в условиях чудовищного давления вышележащей толщи льда (около 10^6 Па на 100-метровой глубине). Скорее всего, при скольжении ледника по ложу, если оно действительно имеет место, решающее значение имеет появление водяной смазки за счет теплоты трения, что приводит к снижению коэффициента трения.

Аномальное движение. В динамике некоторых ледников время от времени проявляются аномалии — скорость их движения неожиданно резко увеличивается на один-два порядка и через какое-то время возвращается на прежний уровень. В гляциологии для таких явлений используется специальный термин — «пульсация», а ледники, претерпевающие пульсации, так и названы — «пульсирующими». Определение «пульсирующий ледник» явилось бы подходящим, если бы ледниковый язык то продвигался бы вниз, то «втягивался» бы обратно в определенном ритме. Здесь же мы в течение многих лет наблюдаем нормальное поведение ледника, сменяемое его катастрофической подвижкой, из-за «стремления»

области питания ледника освободиться от «излишнего» накопленного груза. Затем все возвращается в прежнее состояние.

Главные возникающие вопросы таковы:

- что вызывает пульсацию?
- как это все начинается?
- каковы причины крайне больших скоростей движения?

Среди распространенных мнений особо популярна гипотеза быстрого скольжения ледника по его ложу при пока не очень понятном участии воды в этом процессе. Установлены следующие факты:

- пульсируют ледники любых типов и размеров;
- период пульсации может длиться от единиц до сотни лет;
- активная фаза (подвижка) составляет менее 10 % длительности периода пульсации;
- период пульсации слагается из двух стадий — подвижки и восстановления;
- при подвижке на леднике происходит перераспределение массы льда по длине сверху вниз, но зоны оттока и выноса не вполне соответствуют областям аккумуляции (питания) и абляции.
- поверхность ледника во время подвижки недоступна, ледник хаотически раздроблен или расколот на отдельные блоки, сохраняющие вертикальное положение.

Пульсирующими называют ледники, которым свойственны резко выраженные релаксационные колебания (Гляциологический словарь, 1984). Вообще-то релаксационные колебания возникают в нелинейных механических системах, в которых особую роль играют диссипативные явления — рассеивание энергии из-за воздействия сил внешнего и внутреннего трения. Поскольку речь идет об автоколебаниях в поведении ледников, поддерживаемых внешними источниками массы и энергии (но не требующих от последних именно периодических воздействий), то последние имеют определенную периодичность, как всегда в природе не очень четкую и очевидную, но статистически проявляющуюся вполне определенно. Каждый такой период делится на этапы, соответствующие медленным и быстрым изменениям состояния релаксирующей системы, что позволяет рассматривать релаксационные колебания как разрывные. Последние несколько идеализированно можно представить как последовательность медленных изменений состояния ледника, начинающихся и заканчивающихся скачкообразными его изменениями (разрывами). В этом случае период медленных изменений может быть отождествлен со временем релаксации (количественной характеристикой процесса релаксации как процесса восстановления утраченного равновесия).

Время релаксации (именуемое гляциологами «стадией восстановления»), исчисляемое от окончания подвижки ледника до начала следующей, вместе со временем самой подвижки (условно

рассматриваемым как разрыв непрерывного процесса) и составляет «период пульсации». Можно, конечно, трактовать и состояние ледника перед его очередной пульсацией как неравновесное и его катастрофическую подвижку как своего рода релаксационный процесс, призванный освободить область питания ледника от излишней массы льда. Но в этом случае период между моментами начала двух последовательных подвижек должен быть разделен на три этапа, соответствующих следующим состояниям ледника: подвижка — возвращение в равновесное состояние (релаксация) — постепенный переход в неравновесное состояние — подвижка.

Описанное представление вещей не исчерпывает проблему, так как не объясняет механизм выхода ледника на разные уровни его состояния и готовность его к катастрофической подвижке. В то же время оно позволяет упорядочить наши представления о происходящем и ощутить общность многих физических процессов, связанных с релаксационными колебаниями.

Видимо среди гляциологов существует согласие относительно той идеи, что ледниковые подвижки вызываются не столько внешними воздействиями, сколько внутренними свойствами и особенностями самих ледников. В то же время достаточно очевидно, что внешние события (многолетние климатические колебания, особенно касающиеся выпадения осадков и температурного режима) не могут не влиять на сокращение или удлинение времени между последовательными подвижками любого пульсирующего ледника, а также вообще на статистику временных и пространственных закономерностей аномального поведения ледников в различных горных системах.

Однако главным вопросом проблемы остается, конечно, следующий: каков механизм резкого увеличения скорости движения ледника, находящегося в стадии пульсации? Постараемся, хотя бы приблизительно, осветить этот вопрос.

Лед как вещество полон противоречий — в зависимости от характера приложенной к нему силы (удар или постоянное длительное воздействие) он может реагировать и как упругое (даже хрупкое) тело, и как пластичное (и способное к течению). В этой противоречивости содержится ответ на многие вопросы, возникающие в данном контексте.

К концу отрезка времени, отсчитываемого от момента достижения ледником присущего именно ему равновесного состояния, до момента накопления в зоне его питания определенного избытка массы льда ледник приходит в определенное критическое состояние. При этом вследствие объемной деформации и формоизменений обычно происходит потеря прочности ледового монолита. В конце концов при неудержимом возрастании напряжений в теле ледника в принципе возможны два исхода:

• либо лед немедленно растрескается и разрушится, распавшись на отдельные вертикальные глыбы;

• либо сначала усилится пластическая деформация, накопление которой может превысить определенный предел, после чего разрушение льда становится неизбежным.

Если напряжения в ледниковой толще будут сопровождаться разного рода импульсивными составляющими или ударными воздействиями (падение снежных лавин и ледовых обвалов, сейсмические проявления), то появляется вероятность его «досрочного» разрушения.

Что же происходит с массивом льда, раздробленным на отдельные вертикальные глыбы вплоть до скального ложа или, возможно, до достаточно выраженной поверхности более инертной нижней части ледника? Он приобретает способность к так называемому «глыбовому» (блоковому) скольжению. Теперь перед нами уже не ледяной монолит, способный под действием напряжений только к пластическому течению со всеми его особенностями и в частности с часто определяющим ситуацию «эффектом третьего измерения», а система разрозненных, хотя и взаимодействующих друг с другом вертикальных призм. Главное, что такая система обретает способность свободно двигаться единым потоком, испытывая только пограничные скользящие столкновения с такими же глыбами, но попавшими в «застойные» зоны «ледяной реки» с ее сужениями и расширениями. Именно такое освобождение потока от ранее сковывавших его движение собственных практически неподвижных элементов и лежит в основе многократного увеличения его скорости и вообще самой подвижки ледника.

Итак: *разрушение цельности ледника — первично, быстрое движение — вторично.*

Среди гляциологов бытует убеждение, что пульсирующие ледники — это особый класс ледников, отличающийся рядом морфологических особенностей, и что главная задача — это установление для каждого конкретного ледника диагноза — пульсирующий он или непульсирующий. В поисках такой диагностики предложены статистические методы в разных модификациях. Подыскивались такие морфометрические показатели (площади ледников, отношения площади питания к площади абляции, уклоны ледниковых языков и т. п.), которые позволили бы установить связь между ними и двухзначным качеством ледников: да—нет. Поскольку последнее оценивалось по фактическим наблюдениям, то всегда оставалась неопределенность при выборе «непульсирующих» ледников. Присутствует также неопределенность, порождаемая самой статистической сущностью подхода.

Существуют ли прямые диагностические признаки? Если да, то они должны исходить из анализа условий залегания избыточ-

ных масс льда в зоне питания и морфологических особенностей их вместилища. Если последнее таково, что собственная сила тяжести обеспечит в ледяном теле, скованном с боков крутыми скальными откосами, достаточно высокие сжимающие напряжения, то последние не позволят развиться процессам разрушения ледника. В этом случае увеличенная скорость вязко-пластического течения будет постоянно компенсировать дополнительное накопление ледовой массы в зоне питания. Если же при наличии избытка ледяных масс будут преобладать сдвигающие или даже растягивающие напряжения, то описанный выше процесс разрушения ледника ничем не будет остановлен.

Возможно, имеет право и такая постановка вопроса: быть может, все ледники в принципе способны к подвижкам, однако период релаксационных колебаний у некоторых из них столь велик, что просто не мог быть зафиксирован? Или сами подвижки не всегда столь разрушительны?

Видимо уже уместно подумать о создании инженерных методов оценки вероятности и размеров ледовых подвижек.

5.4.4. Ледниковый сток

Словосочетание «ледниковый сток» не всегда понималось и понимается однозначно. В начале XX в. господствовал миф, поддержанный авторитетом Э. М. Ольдекопа (1917) и Л. К. Давыдова (1929), о преобладающей роли ледников в питании рек, например Средней Азии. Строго говоря, ледниковый сток — это результат таяния непосредственно льда (В. Л. Шульц. Реки Средней Азии. Л., 1965), и постановка вопроса о включении в это понятие дополнительного слагаемого за счет таяния фирновых полей или сезонного снега на ледниковых языках явно не правомочна. И судя по всему, «строго ледниковый сток» для вышеназванной территории составляет менее 10 % общего стока.

Расчеты таяния снега, фирна и льда в ледниковых бассейнах принципиально не отличаются от таковых в речных бассейнах. Что, безусловно, следует учитывать, так это последовательность таяния сначала сезонного снега на языках ледников, а затем, после его исчезновения, уже непосредственно льда вплоть до выпадения снега или прихода устойчивых отрицательных температур. Должна быть учтена разница в плотности льда и снега: при прочих равных условиях стаивание льда приводит к более высокой интенсивности поступления воды на поверхность ледника, чем стаивание снега. Талые воды текут по разработанной микроручейковой сети по поверхности ледника, утекают через трещины и ледниковые мельницы в его глубины, но, в конце концов, выходят одним или несколькими потоками из ледниковых гротов.

Для режима ледниковых ручьев и речек характерен хорошо выраженный суточный ход. После исчезновения сезонного снежного покрова тающие ледниковые языки становятся основным источником питания рек высокогорья.

С ледниками связана целая серия специфических явлений и процессов: прорывы озер, подпруженных ледниками, прорывы внутриледниковых водоемов, гляциальные селевые потоки, ледокаменные лавины. Речь об этих опасных гидрологических явлениях пойдет в следующем подразделе. Но почти все эти явления случаются в основном и исключительно в горах.

5.5. Бедленды — территории особо активного поверхностного стока

Районы крайнего проявления поверхностного стокообразования и эрозионного размыва находятся в пределах аридной и полуаридной зон. Они обычно приурочены к платообразным невысоким хребтам, возвышенностям, грядам и увалам, сложенным мягкими горными породами, иногда с более твердыми прослойками. Чаще всего это песчано-глинистые или пестроцветные толщи, конгломераты, мергели, лессы. Бешеная эрозия превратила такие поверхности в замысловатые системы рытвин, борозд, русел, каньонов и острых гребней или округлых водоразделов, получивших специфическое английское название «бедлендс» — дурные земли.

В Средней Азии подобные образования называются адырами, хотя последние могут быть иногда расчленены и не столь предельно, как это мы требуем от настоящих бедлендов. Однако адыры, наиболее известные своей селевой деятельностью, являются подлинными бедлендами.

Редкие, но сильные ливни, отсутствие растительности, низкая инфильтрационная способность и податливость размыву горных пород — вот исходные предпосылки для образования бедлендов и наносоводных селей.

Обычно такие селеносные адыры и бедленды тихо «изнывают» под солнцем, но в короткие ливневые мгновения «предаются крайней распущенности».

Интересным правилом, которому природа редко изменяет, является приуроченность селевых бедлендов к первому, более низкому поясу горного обрамления долин и котловин разных размеров. Такие гряды обычно вынесены вперед от более крутых и высоких стен регулярных хребтов и сплошной полосой или пунктиром обозначают границу горного и равнинного миров. Селевую деятельность бедлендов можно, таким образом, отнести к разря-

ду пограничных гидрологических инцидентов. По обе стороны «границы» стихия ведет себя по-разному.

На контакте Великих Равнин и Скалистых гор, в полосе, протянувшейся из Канады через все Соединенные Штаты, интересующие нас территории встречаются почти повсеместно. Но есть среди них и особо рафинированные, предстающие во всей красе подлинных бедлендов. Назовем некоторые из них.

Ред-Дир-Бедлендс — Канадская провинция Альберта, бассейн р. Ред-Дир, притока Южного Саскачевана. Эрозия обнажила здесь пласты породы со скелетами динозавров и других палеонтологических древностей. У города Драмхеллера здесь можно видеть и следы динозавров.

Килдир-Бедлендс — находится юго-западнее городка Килдир близ границы канадской провинции Саскачеван и американского штата Монтана.

Долина Биг-Мадди (что условно можно перевести как Большая Грязища) — расположена в сотне километров восточнее Килдир-Бедлендс также возле американской границы.

Бедленд в горах Хайвуд (2 261 м) *и Бэрпо* (2 105 м) в штате Монтана, разделенных долиной верхней Миссури.

Бедленд правобережья Малой Миссури в штате Северная Дакота.

Биг-Бедлендс (Большие Дурные Земли) — расположены у юго-восточного края изъеденного эрозией гранитного массива Блэк-Хилс (2 207 м), известного памятником на горе Рашмор, где изваяны шестиметровые головы четырех выдающихся президентов США — Вашингтона, Джефферсона, Линкольна и Теодора Рузвельта, в междуречье притоков Миссури Шайенн и Уайт-Ривер. Здесь также случались находки ископаемых животных.

Бедленд в бассейне р. Северный Платт близ города Скотсблафф, штат Небраска.

В Скалистых горах следует упомянуть бедленд предгорного обрамления Гранд-Месы, массива в междуречье р. Колорадо и ее притока Ганнисон вблизи устья последнего, штат Колорадо. А на плато Колорадо бедленд в горах Генри, правобережье р. Колорадо, штат Юта, и Голубую Месу в бассейне р. Пуэрко, притока Литл-Колорадо, штат Аризона.

Вообще на плато Колорадо бедленды и селевые потоки распространены необычайно. В междуречье рек Сан-Хуан и Литл-Колорадо, пишет автор тома «Северная Америка» из известной серии «Geographia Universele» Анри Боли (Париж, 1935), «пласт песчаников малой прочности распадается на части, образуя то отвесные стены в сотни метров высоты, то завесы с полостями ниш, то башни и колокольни фантастических очертаний; сланцеватые и многоцветные глины образуют крутые откосы, изрытые рвами, с бесчисленными ступенями...Подвижного материала так много, а склоны настолько круты, что каждый ливень сбрасывает

в каньоны целые потоки из песка и ила: в несколько минут ручей чистой воды, затерянный среди песков, погребается под лавиной грязи, маслянистая поверхность которой напоминает по виду расплавленный металл».

Интересно, что даже в сравнительно крупных реках этого района иногда вместо воды, пусть даже очень мутной, течет суспензия довольно высокой плотности. Вот некоторые примеры такой «гиперконцентрации»: Литл-Колорадо у Камерона при расходе 161 $м^3/с$ $\gamma = 1630$ $кг/м^3$, Пария у Лис-Ферри — при 18 $м^3/с$ $\gamma = 1670$ $кг/м^3$.

Очень характерны бедленды в горном обрамлении Долины Смерти, штат Калифорния. Селевые потоки со всех сторон заполняют эту вытянутую депрессию, расположенную ниже уровня моря (–85 м).

Бедленды — настолько великолепное и своеобразное зрелище, что многие выдающиеся представители этого вида ландшафта вместе с интересными сопутствующими объектами превратились в заповедники. Это — национальные парки Бедлендс (Южная Дакота), Теодора Рузвельта (Северная Дакота), Петрифайд-Форест (Окаменелый лес, Аризона), Грасленд (Саскачеван), провинциальный парк Динозавров (Альберта) и национальный памятник Долина Смерти (Калифорния).

Одной из величайших котловин мира, к тому же окруженных первоклассными хребтами, в данном случае это Тянь-Шань и Кунь-Лунь, является Таримская, частично засыпанная песками пустыни Такла-Макан. Последнюю с севера, запада и юга обрамляют в виде горных аванпостов передовые гряды, многие из которых являются великолепными бедлендами.

Известный пример — горы Топатаг, служащие аванпостом Кунь-Луня на участке между долиной прорыва р. Тизнаф и массивом Сырогазтаг (5210 м). Русский путешественник М. В. Певцов, посетивший эти места в 1889 г., писал: «Горы Топатаг отличаются необычайным расчленением, остротой гребней и чрезмерной крутизной своих склонов. Они повсюду изборождены целым лабиринтом узких, извилистых долин и сумрачных ущелий. Эти глубокие долины и теснины, в свою очередь, разветвляются на множество побочных, еще более узких долин, лощин и щелей. Бока всех долин очень круты, а стены ущелий почти повсеместно отвесны; падения же тех и других чрезвычайно велики. Поэтому после каждого обильного дождя с этих гор несутся с оглушительным ревом и страшной быстротой многочисленные потоки, иссякающие вскоре по прекращении ливня».

К северо-востоку от Кашгара, со стороны Тянь-Шаня, расположен Арпалыктаг, отгороженный от Таримской равнины менее расчлененными горами и являющийся одной из гряд обрамления юго-западного угла межгорной котловины Джаилган.

Кельпинчельтаг (Калпинтаг). Очень длинная (около 250 км) и узкая (6—12 км) гряда, поднимающаяся с севера над Таримской равниной на 600—1 000 м (максимальная абсолютная отметка 2 723 м) и сложенная на западе серо-желтыми, а на востоке красноцветными породами. Именно вдоль нее проходит автомобильная дорога Кашгар-Аксу.

Чультаг. Длинная (190 км) и узкая (6—12 км) красноцветная гряда, возвышающаяся над Таримской равниной на 600—800 м (максимальная высота 2 408 м), Байская депрессия, отделяющая Чультаг от основных цепей Тянь-Шаня, в свою очередь на севере граничит с полосой бедлендов.

По описанию геолога Е. И. Селиванова, «Чультаг — совершенное архитектурное творение, созданное самой природой... Это — горы, над "отделкой" которых усердно работали в течение многих тысячелетий вода и ветер. Ими созданы удивительные формы, контуры которых, возможно, вдохновляли строителей буддийских храмов...В крутых стенах сая поражает частая смена не только состава пород, но и их цвета. Глины серые с голубоватым оттенком чередуются с глинами шоколадно-коричневого или светло-коричневого цвета, со светло-серыми песчаниками, кое-где с налетом малахита, или со светло-коричневыми ... Склоны ... представляют собой узорчатое расчленение в виде рядов треугольных башенок».

Ливневой сель в Чультаге — это «ревущий поток жидкой коричневато-желтой глины».

Бедленды присущи восточной части Монгольского Алтая и всему Гобийскому Алтаю, но в основном отрогам и боковым отдельным хребтам небольшой относительной высоты.

По-бедлендовски расчленены западные склоны горных массивов Дзун-Джаргалант-Нуру (3 696 м) и Бумбат-Хайрхан (3 552 м), юго-западные и южные склоны хребтов Хасагт-Хайрхан (3 582 м) и Хан-Тайшир-Нуру (3 155 м). В Гобийском Алтае бедленд обычен почти во всех хребтах.

Приведенные выше примеры бедлендов, с одной стороны, наиболее типичны и ярки, но с другой — довольно случайны. Перечень может быть продолжен и распространен не только на иные горные системы, но и на другие материки. Вновь несколько примеров.

Расчлененная холмистая местность (85×17 км) севернее города Константина, сложенная серыми глинами и красными конгломератами, и дикие, глубокоизрезанные мергелевые цепи Блидского Атласа в северном Алжире (Африка), бедленды в районе Алис-Спрингс в горах Макдоннел (Австралия), в пустыне Негев на юге Израиля (Ближний Восток), в Лунной долине аргентинской провинции Сан-Хуан (Южная Америка).

Бедленды широко распространены в Средней Азии, где они располагаются по периферии горных систем Тянь-Шаня и Памиро-Алая и в обрамлении межгорных котловин. Их много в пест-

роцветных низкогорьях, заполняющих Южно-Таджикскую депрессию от Дарваза до Кугитанга, в Западном Копетдаге, в котловинах внутреннего Тянь-Шаня, таких как Кочкорская или Котменьтюбинская (Токтогульская), в Прииссыккулье и, конечно, в Ферганской долине. О знаменитых ферганских адырах и адырных селях поговорим подробнее.

Вдоль зеленого массива возделанных полей и садов с городами, кишлаками и арыками протянулись палево-желтые безжизненные поверхности, чаще всего предельно расчлененные и от этого странно притягательные. Эти адырные гряды следуют вдоль предгорий хребтов Ферганского окружения — Кураминского, Чаткальского, Ферганского, Алайского и Туркестанского.

Ферганские адыры группируются в три самостоятельные полосы — западную, северную и южную. Первая из них протянулась от города Ходжента вдоль правого берега Сырдарьи и Кайраккумского водохранилища до района поселка Ашт. Вторая, состоящая из четырех основных адыров, — Чуст-Папского, Сурсанского, Наманганского и Майлисуйского, простирается на 130 км от долины Чадаксая на западе до района города Ташкумыра на востоке.

Третья, южная, полоса, в состав которой входят Капчигайский, Чимионский, Талмазарский и Андижанский адыры, имеет в длину примерно те же 130 км и, начинаясь у города Чимион, заканчивается горами Каракиякыр в междуречье нижнего течения двух притоков Карадарьи Кугарт и Караунгур.

Андижанские адыры названы по имени города Андижан, которому они угрожают своими селевыми потоками. Наиболее селеопасным является адыр Бешбуз, возвышающийся на 300—400 м над южной окраиной города. Площадь адыра около 80 км^2. Крутизна склонов сильно расчлененного адыра характеризуется следующими цифрами: 69 % его территории имеют угол наклона, превышающий 25°, 45 % — > 35°, 14 % — > 45°.

Селевые потоки подходили к Андижану в 1914, 1932, 1934, 1945, 1953, 1956, 1959, 1966, 1967 гг. Особо пострадал город в 1953 и 1967 гг. Для его защиты на саях адыра Бешбуз построено 42 селехранилища разных размеров. Наносоводные сели, приходящие с адыра, редко имеют плотность, заметно превышающую 1 120 кг/м^3.

Чуст-Папский адыр (по названию населенных пунктов Чуст и Пап). Интересны округленные цифры, характеризующие степень расчлененности этого бедленда (табл. 5.4).

Густота микроручейковой сети достигает 5 м/м^2. В мелкоземе, слагающем поверхность адыров, содержание частиц размером менее 1 мм составляет 80—90 %, а максимальные размеры обломков обычно не превышают 2 см.

Подбирая (это было еще в мае 1978 г.) подходящий объект для изучения формирования наносоводных селей среди адыров Фер-

Таблица 5.4. **Характеристики Чуст-Папского бедленда**

Длина русловых врезов, м	Густота сети русловых врезов, м/м^2	Площади водосборов, тыс. м^2	Углы наклона водосборов, град
50	0,25	1	65
100	0,20	6	50
300	0,10	50	40
1 000	0,05	200	35

ганской долины, мы остановились на совершенно великолепном бассейне, мутные селевые воды которого во время ливней вливаются справа в реку Гавасай в том месте, где она пересекает полосу Чуст-Папских адыров, сильно расчлененных асимметричных увалов, сложенных конгломератами и суглинками и поднимающихся над днищами окружающих долин всего на 150—200 м. Выбранный селевой бассейн площадью несколько квадратных километров лежит в местности, носящей черты подлинного бедленда. Исчерченные дендровидными узорами микроручейковой сети глинистые склоны, лишенные растительности, окружают ветвящийся русловой лабиринт. Вместе с острыми водораздельными гребнями, иногда затупленными (через адыр перегоняют стада баранов), и округлыми останцами на стыках гребней они создают какой-то фантастический пространственный барельеф, орнамент, гигантскую мозаику, как бы сложенную из множества серо-желтых плит различной освещенности в какой-то целеустремленной системе, в которой присутствуют одновременно и хаос, и упорядоченность.

Во время ливня такой адыр непроходим. Отовсюду низвергаются потоки дождевой воды, перегруженные наносами, кое-где сползают грязевые микропотоки, способные продвинуться только до ближайшего русла, где их самих тут же размоет, а их материал унесет наносоводный сель. Единый шумовой фон составляет шелест дождя, какое-то бульканье, журчание, грохот малых и больших потоков.

Очень похожа на описанные адыры полоса оголенных склонов, вытянувшихся по предгорьям Терскей-Алатау вдоль южного берега озера Иссык-Куль. Здесь, правда, нет столь жестокого бедленда, но повсеместны проявления глинистого карста. Бешеные ливневые потоки через многочисленные воронки и колодцы исчезают в толще лессовидных суглинков, чтобы, промчавшись по подземным галереям и туннелям, вновь излиться в русло через какое-нибудь отверстие или щель. Некоторые многометровые колодцы с долго сохраняющейся на их дне водой даже опасны для неосторожного путника.

ГЛАВА 6
ОПАСНЫЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

6.1. Проблема

Стихийные бедствия существуют лишь в силу того, что человек часто живет и работает в местах, которые являются ареной развития опасных гидрологических явлений, иногда и катастрофических. Ирония судьбы заключается в том, что зачастую такие территории оказываются по разным причинам очень привлекательными для освоения и даже заселения. И опасность их использования при этом просто-напросто игнорируется.

Как удержать людей от пребывания на опасных территориях? Что этому мешает? Во-первых, неверие обывателя в реальную опасность столь якобы далеких событий. Отсутствие осведомленности об угрожающих явлениях, порожденной неполнотой или искажением информации, ее неполноценностью, нечеткостью, противоречивостью. Оказавшиеся несостоятельными прогнозы и предупреждения, вызвавшие ложные тревоги и беспокойства. Существует отчуждение между населением и властями разного ранга из-за отсутствия профессионализма при предупредительных и спасательных мероприятиях, а также промедлений и уклонений при организации экстренной помощи или послекатострофических компенсаций.

Очень важно понимать, что настоящая опасность исходит не от природы и ее стихий, а от преступного равнодушия, глупости, алчности и неосведомленности человека, обитающего среди природных явлений без оглядки на них и спохватывающегося лишь тогда, когда грянет гром. Такое положение вещей многократно усугубляет последствия природных катастроф. Таким образом, стихийные бедствия — явление более социальное, чем природное. Многие природные процессы, сопутствующие формированию стока и течению воды в реках, относятся к разряду опасных или вредных гидрологических явлений. Это наводнения, разного рода прорывные паводки, эрозия почвы, селевые потоки, оползни и многое другое.

Большинство опасных гидрологических явлений, о которых речь пойдет ниже, связаны почти исключительно с горными условиями. Более подробные сведения об опасных гидрологических явлениях читатель может получить в публикациях одного из авторов этой книги [4, 5].

6.2. Наводнения

Если текущая вода по каким-либо причинам не умещается в русле, то она выходит из берегов и затопляет окружающую территорию. Здесь течение замедляется или становится вообще невозможным, что способствует застаиванию воды и еще большему затоплению. Среди причин такой ситуации могут быть названы три:

1) исключительно большой приток воды в результате стремительного снеготаяния или обильных ливней в бассейне реки;

2) ветровой нагон воды в устьевых областях рек;

3) неожиданное возникновение преграды течению реки — завалы, оползни, ледяные плотины, заторы и зажоры.

Чрезмерное затопление территории называют наводнением. Сильные наводнения — это всегда бедствие. Наиболее сложно судить о возможных размерах наводнений, вызванных первой причиной. Эти размеры всегда связаны с величиной максимальных расходов, но далеко не однозначно. Полное представление об источнике наводнения может дать только гидрограф стока.

Для определения возможных площадей и выделения конкретной территории затопления необходимо иметь информацию о соотношении расходов и уровней воды по длине реки и о взаимодействии речного потока с окружающей местностью при тех или иных его уровнях и скоростях. Многочисленные локальные особенности, обычно не отражаемые даже на крупномасштабных картах, вносят свои коррективы в общую картину. Реальное представление о зонах затопления при наводнениях могут дать, пожалуй, только аэро- и космические снимки.

Второй вариант наводнения определяется величиной расхода притекающей сверху воды и степенью ветрового воздействия, затрудняющего выход этой воды в море или озеро.

И, наконец, третий вариант связан с заторами и в меньшей мере с зажорами. На крупных реках, особенно текущих на север, совпадение половодья с ледоходом часто приводит к заторам — массовым нагромождением льдин, частично перекрывающим пути течения воды. Следствие — подъем уровня и локальное наводнение. Этому способствует встреча ледохода с еще сохранившимся ниже по реке достаточно прочным ледовым покровом. Чаще всего заторы приурочены к поворотам или сужениям русла, а также к участкам с островами и протоками.

В принципе на каждой реке встречаются участки, где заторы случаются особо часто. Очень важно понимать, что любой затор, даже возникающий в одном и том же месте, всегда сугубо индивидуален. Взаимодействие системы скоплений обломков льдин, водного потока и русловой морфометрии определяется вполне

конкретными физическими закономерностями, но одновременно и целым набором случайностей. Названная система всегда имеет свои «ключевые точки» и «центр равновесия». Диагноз затора и распознавание его особых точек является непростой задачей. Но ее решение необходимо, ибо искусственное воздействие именно на них, а они чаще всего вовсе не очевидны, может привести к рассасыванию затора и снижению опасности наводнения. Воздействия без учета этого условия или неэффективны, или же могут усилить опасность наводнения.

6.3. Прорывные паводки

6.3.1. Общие положения

Большие уклоны и перепады высот, особенно при слабой устойчивости склонов, активности гляциальных явлений и сейсмических воздействиях, иногда приводят к перегораживанию рек естественными плотинами, прорывы которых бывают катастрофическими. События такого рода всегда необычны и уникальны, ибо «выброс» величин расходов, уровней, скоростей выходит далеко за пределы обыденности. И условия формирования прорывного феномена также исключительны и не имеют ничего общего с обычным состоянием реки и ее бассейна.

Самым животрепещущим аспектом проблемы завалов речных долин, ущелий и каньонов представляется оценка продолжительности жизни подпруженного озера. «Быть или не быть», что пересилит — река или дамба, вот в чем вопрос. А вообще такие озера могут быть временными, существующими считанные часы, дни, месяцы, или же условно постоянными. Интуитивно понятно, что чем дольше продержится плотина, то тем, при прочих равных условиях, грандиознее прорыв. Материал, из которого природа «строит» свои завалы, — это обломочная горная порода или лед.

6.3.2. Прорывы горных завалов

Особо крупные горные обвалы и оползни, полностью перекрывающие течение реки, происходят достаточно редко. Однако если иметь в виду не отдельную долину или даже горную систему, а всю планету, то это — уже реальное, время от времени случающееся событие. Никакие надежные априорные прогнозы здесь почти невозможны, и способы предотвращения прорывов всегда

привязаны к конкретному объекту. Ниже приведены примеры выдающихся случаев.

Ущелье р. Инд, район восьмитысячника Нанга-Парбат, 1841 г. Часть горы Хату-Пир обрушилась, полностью перекрыв течение реки на 6 месяцев. Когда уровень воды достиг вершины завала, а длина образовавшегося озера составила 56 км, произошел прорыв. Подобное явление повторилось в 1858 г.

Оползень «Гхона» в долине р. Берихи-Ганга (приток р. Алакнанды, бассейн Ганга), октябрь 1893 г. Плотина высотой 350 м. Озеро площадью 10 км^2. Прорвалось в августе следующего года. Уровень р. Алакнанда у города Сринагар (90 км ниже по течению от места прорыва, не путать со столицей Кашмира) поднялся на 50 м.

В 1950 г. сейсмический толчок вызвал обвалы, которые перекрыли течения рек Дибанг и Субансири. Последующий прорыв вызвал наводнение и хаос на площади 775 км^2 в долине р. Брахмапутры.

Обломочная лавина «Маюнмарка» (Перуанские Анды) объемом от одного до 1,6 млрд м^3 25 апреля 1974 г. образовала 150-метровую дамбу в ущелье Квебрада-Кочакай, выходящем в долину р. Мантаро (бассейн Укаяли, Амазонки). Возникшее озеро при максимальном наполнении имело объем 670 млн м^3 и длину 38 км. Прорыв состоялся 8 июня. Высота прорывной волны у Эсмеральды (15 км ниже дамбы) составила 35 м.

Известны случаи, когда быстрая проходка канала в теле завала ликвидировала угрозу прорыва. Так поступили в США с завалом, случившимся 17 августа 1959 г. на р. Мэдисон, Монтана (28 млн м^3), и в Таджикистане с завалом, произошедшим 24 апреля 1964 г. на р. Зеравшан близ устья р. Фандарья (более 20 млн м^3).

Иногда горные озера завального происхождения существуют столетиями, и тем неожиданнее оказывается их прорыв. Так случилось с озером Яшинкуль (Алайский хребет). Озеро было расположено на высоте 2616 м за 170—250-метровой дамбой трехсотлетнего возраста. В 1966 г. после многоснежной зимы и холодной весны июнь оказался экстремально теплым. В озере скопилось 6,6 млн м^3 воды. 18 июня из тела завала стали выпадать камни, а затем последовал прорыв. В течение 2—3 ч озерная чаша опустела. 10-метровый вал со страшным ревом понесся вниз по ущельям рек Тегермач и Исфайрамсай. Максимальный расход составил 2000 м^3/с.

6.3.3. Прорывы озер, подпруженных ледниками

Одной из самых крупных гляциальных катастроф является прорыв временно подпруженных ледниковых озер. Завальные озера, возникшие в результате обвалов и оползней горной породы, мо-

гут существовать десятки, сотни и тысячи лет, хотя и они могут прорваться. Ледяные же плотины, сколь бы мощными они ни были, недолговечны, лед тает, трескается, отдельные его блоки всплывают, и разрушение такой плотины — вопрос времени.

Возникновение, активная деятельность и исчезновение прорывающихся озер представляются закономерными проявлениями некоторых сторон оледенения горной территории. Относительно механизма явления можно предложить три основных положения:

1) озера практически не опорожняются путем простого перелива через ледяную плотину;

2) по достижении определенного уровня (около 0,9 высоты плотины) подпруженного озера проявляется эффект всплывания ледяного барьера или его отдельных блоков; по-видимому, именно этот эффект создает дополнительные возможности открытию путей проникновения воды через тело ледяной плотины;

3) достаточно тепла, выделяемого за счет превышения температуры воды над температурой тающего льда и особенно диссипации энергии водного потока, движущегося через незначительный внутриледниковый или подледниковый канал, для выработки за относительно короткий промежуток времени туннеля, способного обеспечить катастрофический сброс воды из озера.

Процесс опорожнения озера начинается с момента начала истечения воды под ледяной плотиной. Этот процесс определяется двумя основными явлениями — увеличением площади поперечного сечения туннеля и падением гидростатического напора по мере сработки объема озерной воды. Уравнение, связывающее скорость расширения туннеля со скоростью уменьшения объема воды в озере, имеет вид:

$$-\frac{d\omega}{dW} = \frac{\rho_0 g}{\rho^* r x}\left[\frac{C_0}{g}(t_1 - t_2) + h + aW^m\right], \qquad (6.1)$$

где ω — площадь поперечного сечения, м^2; x — длина туннеля, м; W — объем воды в озере, м^3; ρ_0, ρ^* — плотность воды и льда, кг/м^3; $C_0 = 4\,190$ — удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С); $r = 334 \cdot 10^3$ — удельная теплота плавления льда, Дж/кг; $t_1 - t_2$ — разность температуры воды в озере и на выходе потока из туннеля, °С; g — ускорение свободного падения, м/с^2; h — превышение точки входа в туннель над точкой выхода из него, м; a, m — морфометрические параметры озерной чаши (параметры соотношения глубины у входа в туннель H и объема воды в озере W).

Ледник, в теле которого вырабатывается туннель, обычно расколот, и многие туннельные полости связаны с дневной поверхностью ледниковыми мельницами и трещинами. Процесс движения воды через ледяной туннель носит дикий, конвульсивный характер. Явление сопровождается содроганиями ледника, обва-

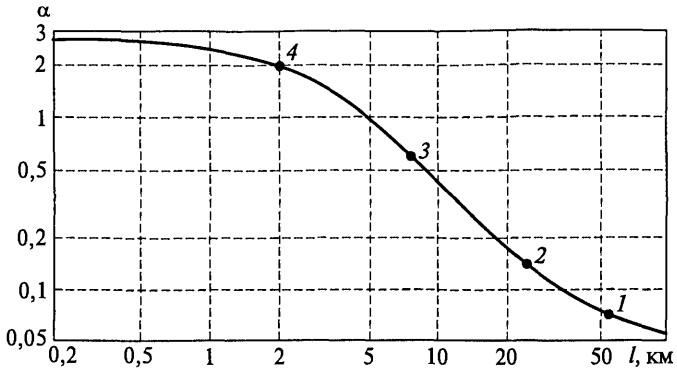


Рис. 6.1. Зависимость коэффициента α в уравнении (6.2) от длины туннеля

лами льда, бьющими из трещин фонтанами воды. Поэтому расход воды через туннель определяется на первый взгляд не по очевидной схеме «длинного напорного трубопровода» $Q = k[(H + h)/x]^{1/2}$, а с помощью выражения $Q = \alpha\omega^{5/4}H^{1/2}$, где коэффициент α, несущий в себе эмпирическую компенсацию большого числа неопределенностей, оценивается, исходя из наилучшего соответствия модели и действительности. Вследствие грандиозной диссипации энергии в соотношении $\alpha \sim 1/x^n$ (~ знак пропорциональности) показатель степени n не равен 0,5 (напорный трубопровод), а превышает единицу (последовательность «коротких» труб со своими показателями локальных и путевых потерь напора). Эмпирическая зависимость коэффициента α представлена на рис. 6.1. Здесь присутствуют точки, соответствующие следующим данным:

Теоретический предел	0	2,70
Озеро ледника Медвежьего	1,90	2,68
Тальсеква	7,25	0,576
Греналоун	23,0	0,141
Гримсветн	50,0	0,072

Эта зависимость недостаточно подтверждена эмпирическими данными. Во многих случаях употребительным может оказаться

частный случай решения уравнения (6.1), полученный в предположении, что температура воды в озере, регулируемая наличием ледяной плотины и плавающих айсбергов, равна нулю:

$$Q = \alpha \left\{ \frac{\rho_0 g}{\rho^* r x} \left[h(W_0 - W) + \frac{a}{m+1}(W_0^{m+1} - W^{m+1}) \right] \right\}^{5/4} \sqrt{aW^m}, \quad (6.2)$$

где W_0 — объем воды в озере перед прорывом.

С помощью этого выражения может быть вычислен гидрограф истечения воды из озера $Q(W)$, который путем численного дифференцирования может быть пересчитан в обычный $Q(t)$, где t — время.

Максимальный расход прорывного паводка будет иметь место при W, которое превращает в тождество соотношение

$$W_0 \left(h + \frac{a}{m+1} W^m \right) = W \left[\left(\frac{2,5}{m} + 1 \right) h + \frac{a}{m+1} \left(\frac{2,5}{m} + 3,5 \right) W^m \right].$$

Примеры работоспособности уравнения (6.2) при α, оцененного по кривой $\alpha(x)$, представленной на рис. 6.1, показаны на рис. 6.2—6.4.

Для каждого отдельного объекта такие прорывы — явление редкое, но в целом для гор, несущих оледенение, они случаются

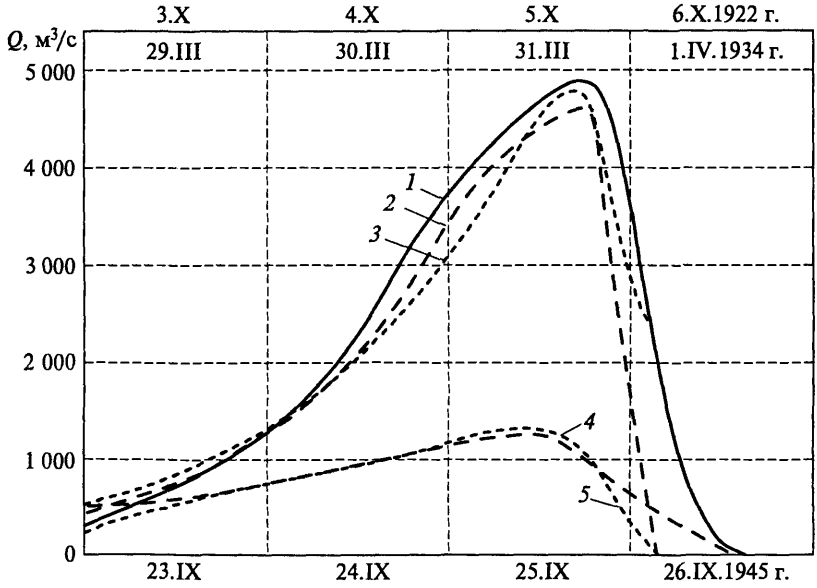


Рис. 6.2. Сравнение рассчитанных (*3* и *4*) и наблюденных гидрографов паводка при прорыве озера Гримсветн (Исландия) в 1922 (*1*), 1934 (*2*) и 1945 гг. (*5*)

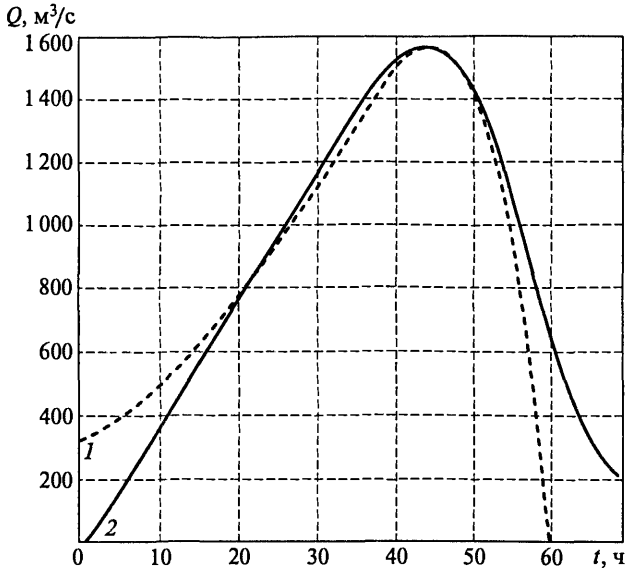


Рис. 6.3. Сравнение рассчитанного (*1*) и наблюденного (*2*) гидрографов паводка при прорыве оз. Тальсеква в 1958 г. (Береговой хребет, граница Британской Колумбии и Аляски)

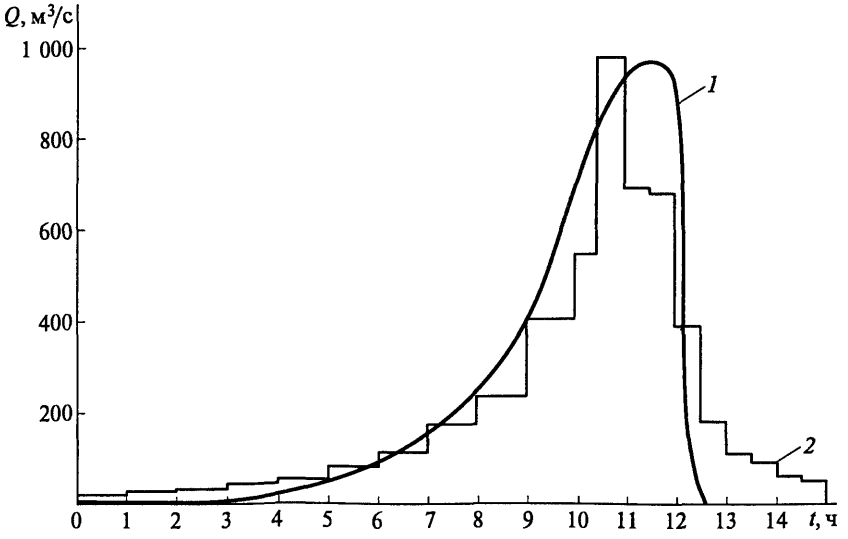


Рис. 6.4. Сравнение рассчитанного (*1*) и наблюденного (*2*) гидрографов паводка при прорыве озера, подпруженного ледником Медвежьим, 19 июня 1973 г. (бассейн р. Ванч, Памир, Таджикистан)

довольно часто и повсеместно. Ниже перечислены некоторые особо известные примеры outbursts of ice-dammed lakes.

Классические объекты в Альпах: озеро Маттмарк (Пеннинские Альпы, ледник Аллалин, 1589—1920 гг., объем до 19 млн м^3); ледник и озеро Рюитор (Грайские Альпы, 1594—1864 гг., объем до 4 млн м^3); ледник и озеро Фернагт (Эцтальские Альпы, 1600—1848 гг., объем до 10 млн м^3); озеро Мэрьелен (Бернские Альпы, Большой Алечский ледник, 1813—1947 гг., объем до 11 млн м^3).

Исландия: озеро Греналоун (ледник Скейдарауръйекуль, 1201—1939 гг., объем до 1,5 млрд м^3, расходы до 6 тыс. м^3/с); озеро Гримсвётн (ледник Ватнайекуль, 1922—1996 гг., объем до 7 млрд м^3, расходы до 50 тыс. м^3/с, формированию озера способствует вулканическое тепло). Именно здесь возник термин «jokulhlaup» для обозначения glacier outburst floods.

Аляска и Британская Колумбия: озеро Джордж (горы Чугач, ледник Ник, 1899—1951 гг., расходы до 10 тыс. м^3/с); ледник и озеро Тальсеква (Береговой хребет, ледниковое поле Джуно, 1910—1951 гг., объем до 0,91 млрд м^3, расходы до 1 600 м^3/с).

Горы Центральной Азии: озеро Мерцбахера (Тянь-Шань, ледник Иныльчек, 1932—1970 гг., объем до 220 млн м^3, расходы до 2 тыс. м^3/с): озеро ледника Медвежий (Западный Памир, хребет Академии Наук, 1963 и 1973 гг., объем до 15 млн м^3, расходы около 1 тыс. м^3/с); озеро Гапшан (Каракорум, ледники Чон-Камдан, Кичик-Камдан, Акташ, 1780—1932 гг., объем до 3,8 млрд м^3).

Известный объект геологического прошлого: озеро Мизула (Северо-запад США, плейстоценовый Кордильерский ледник, возникло несколько десятков тысяч лет назад, объем 2 168 млрд м^3, прорыв в долину реки Колумбия, расход около 10 млн м^3/с).

6.3.4. Прорывы внутриледниковых водоемов

Ледник — это не просто глыба льда, принявшая форму той долины, где она залегает. Внутри ледника обычно имеется скрытая от глаз система полостей и туннелей, свободных или заполненных водой, находящаяся иногда даже под большим давлением. Прорвавшееся озеро оставляет информацию, записанную на склонах озерной чаши. Сложнее обстоит дело в случаях прорыва воды из внутриледниковых полостей. Местоположение их обычно не известно, поэтому чаще можно говорить о косвенных признаках их наличия в леднике, чем о непосредственной фиксации. Тем не менее известно довольно много случаев прорыва именно внутриледниковых водоемов.

Среди известных примеров можно назвать прорывы на ледниках Туюксу (1956 г., Заилийский Алатау), Аксай (1960—1970 гг., Киргизский хребет), Тэт-Русс и Боссон (1892 г., массив Мон-

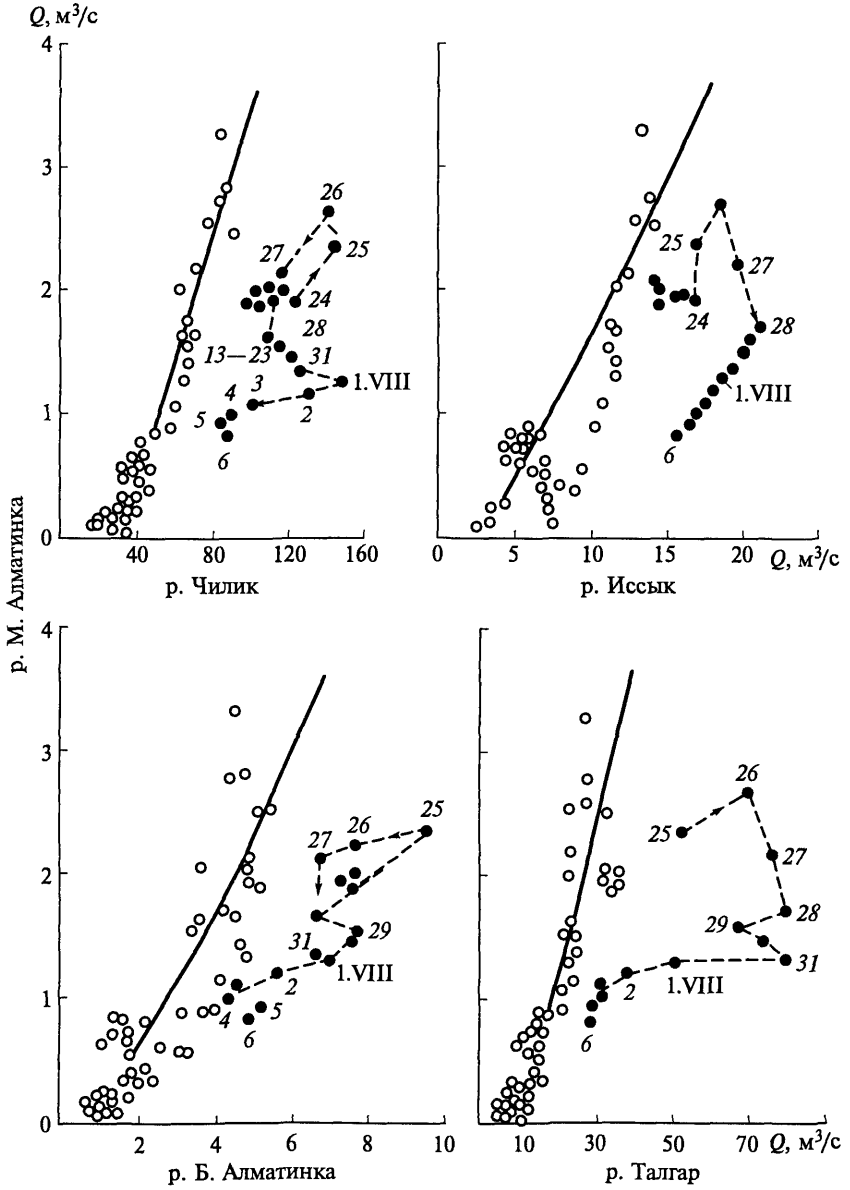


Рис. 6.5. Корреляционные прогностические графики для оценки гляциальной селевой опасности для бассейна р. Малой Алматинки, 1956 г.

В качестве контрольных расходов послужили данные по четырем соседним бассейнам Заилийского Алатау. Селевой поток прошел 7 августа 1956 г.

блан), Йенгуцгар (1930 г., Каракорум), Франца-Иосифа (1965 г., Южные Новозеландские Альпы), Колка (1902 г., Большой Кавказ).

Поставить диагноз: идет накопление воды и ожидается прорыв — принципиально возможно по корреляционным графикам расходов воды соседних ледниковых рек (рис. 6.5). Выброс эмпирических точек в сторону преуменьшения для диагностируемого объекта свидетельствует об опасности возникновения гляциальной прорывной волны. Чем большая часть талой воды будет удержана ледником, тем катастрофичнее может оказаться возможный прорыв и тем заметнее это скажется на режиме стока питаемой ледником реки.

Выпадение сильного ливня на язык ледника может привести к резкому увеличению объема воды, накапливающейся во внутриледниковых полостях. Реальность совпадения двух различных процессов — выпадения интенсивного ливня именно на поверхность тающего ледника и начавшегося накопления талых вод в закрывшейся глетчерной дренажной системе — различна для разных районов. Например, на леднике Федченко (Памир) слой дождя повторяемостью 0,01 составляет лишь 19 мм, а на ледниках Каракорума дожди практически не выпадают. Совершенно иная картина наблюдается, например, на Тихоокеанском Северо-Западе США. Прорывные паводки, сформировавшиеся на южных ледниках горы Рейнир, были спровоцированы интенсивными ливнями. На р. Нискуэлли прорывы 1932, 1934 и 1955 гг. совпали с сильными дождями (соответственно — 221, 252, 140 мм). На р. Кауц-Крик прорывной паводок 1947 г. прошел после дождя со слоем 150 мм.

6.3.5. Прорывы моренных озер

Конечные морены представляют собой нагромождения рыхлообломочной породы, часто прослоенные блоками и линзами льда, отчленившимися или сохранившими связь с телом основного ледника. Моренный рельеф, осложненный многочисленными грядами, холмами, ложбинами, воронками и блюдцеобразными понижениями, именно вследствие присутствия в морене погребенного льда и развития термокарстовых процессов отличается исключительной изменчивостью. Жизнь морены и моренных озер очень динамична и изобилует многими сюрпризами. Размеры озер очень различны: длина и ширина — десятки и сотни (реже тысячи) метров, глубина — единицы и первые два-три десятка метров, площадь — десятки и сотни тысяч квадратных метров, объем — десятые доли и единицы миллионов кубических метров. Два основных типа моренных озер — краевые (приледниковые) и провальные (термокарстовые) — морфометрически различаются: при одинаковых глубинах первые превышают вторые по площади в 2—4 раза. В различных горных системах моренные озера расположены не

всегда на одинаковых высотах: в Тянь-Шане ими отмечен диапазон 3300—3900, в Алае 3700—4300, на Памире 4300—4700 м.

Ледниково-моренный комплекс необычайно динамичен. Озера здесь зарождаются и исчезают, как тихо и незаметно, так и конвульсивно. Прорывы моренных озер случаются повсеместно и не так уж редко. В период повышения температуры воздуха и продвижения нулевой изотермы высоко в горах обострение опасной ситуации идет по двум направлениям: усиливаются термокарстовые проявления, влекущие за собой разного рода изменения во внутриледниковой системе каналов стока, просадку мерзлой обломочной породы и ослабление озерных дамб, и резко увеличивается приток талых вод в озерные котловины, что влечет за собой опасное переполнение последних. Именно при сочетании этих двух процессов ситуация становится угрожающей и достаточно незначительного перелива, чтобы озерная плотина разрушилась, или начавшегося истечения воды, чтобы система гротов и туннелей стремительно расширилась и озеро быстро опорожнилось.

Долгосрочный прогноз о переходе моренного озера в угрожающее состояние может быть дан на основании графика роста объема озера при его максимальном ежегодном наполнении. Наличие постоянного увеличения объема озера свидетельствует о нарастающей вероятности прорыва. Следующие цифры характеризуют подобную ситуацию для моренного озера у конца ледника Туюксу: 1920 г. — зарождение озера, 1951 г. — 20 тыс. м^3, 1956 г. — 32 тыс., 1963 г. — 75 тыс., 1973 г. — 260 тыс. м^3 (рис. 6.6). Эта

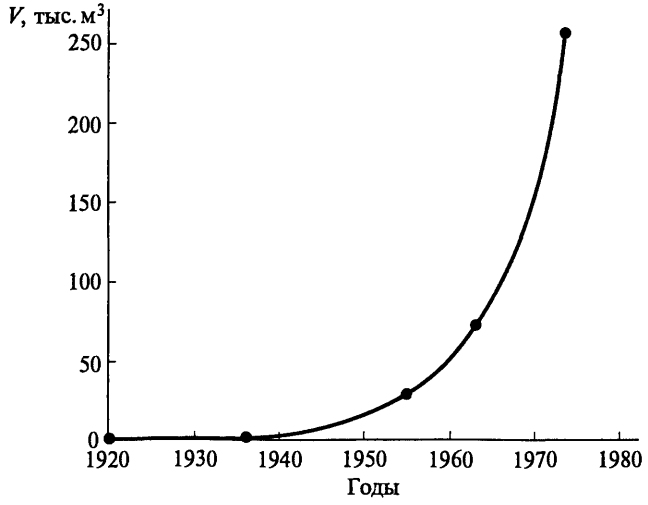


Рис. 6.6. Кривая роста объема моренного озера № 2 у конца ледника Туюксу в бассейне р. Малая Алматинка (Казахстан). Прорыв состоялся 15 июля 1973 г.

ситуация разрешилась прорывом 15 июля 1973 г. (максимальный расход истечения воды из озера 350 м³/с) и возникновением катастрофического селевого потока (объем грязекаменной массы 3,8 млн м³, максимальный расход около 10 тыс. м³/с), который был остановлен плотиной в Медео над Алма-Атой.

6.4. Волновые катастрофы

Если вы, поскользнувшись, упадете в свою ванну, то выплеснете половину воды на пол. А что случится, если в водоем обрушится обвал, оползень, сель? Последствия могут быть самыми разными, но все они связаны с «эффектом бухты Литуя». Названная бухта — узкая (1,6—3,2 км) полоса воды на 11 км внедряется в сушу (Южная Аляска), где разветвляется на две составляющие — фьорды Крильон и Гилберт, в которые спускаются ледники. В результате сейсмического толчка 9 июля 1958 г. скальный обвал объемом 36,5 млн м³ рухнул с километровой высоты в воды фьорда Гилберт. Гигантская волна взметнулась по склону противоположного берега на невероятную высоту — 522 м, вырвав с корнем все деревья девственного леса ниже этой отметки. Подобные явления наблюдались многократно и ранее 1958 г., и не только в бухте Литуя, но именно здесь и тогда достигнута наиболее феноменальная цифра. Нас же с вами интересует проявление эффекта не в открытом в сторону моря, а в замкнутом водоеме.

Итак, речь идет о мощной волне, которая может разрушить естественную или искусственную плотину, подпирающую водоем, или просто перебросить через последнюю массу воды, формирующую в нижнем бьефе паводок или селевой поток.

Широко известно образование вторичного прорывного потока из горного озера Иссык, когда мощный грязекаменный поток, вторгшийся в него, создал такой волновой режим, который привел к разрушению природной плотины и последовавшему спуску озера.

Хрестоматийный пример. В Карнийских Предальпах в долине р. Вайонт в полутора километрах от ее впадения в р.Пьяве, вливающуюся в Венецианский залив Адриатического моря, в 1960 г. была построена тонкая бетонная арочная плотина высотой 265 м и имеющая длину 100 и ширину 3,4 м сверху и 23 м снизу. В водохранилище Вайонт находилось 120 млн м³ воды, когда 9 октября 1963 г. в 22 ч 38 мин по гринвичскому времени мощный оползень объемом 240 млн м³ менее чем за 30 с обрушился в него с левого берега. В месте его падения возникла грандиозная волна, которая за 10 с пересекла 2-километровую акваторию и достигла на противоположном склоне относительной отметки 260 м. Через гре-

бень плотины вода излилась потоком 100-метровой глубины. По реке ниже плотины прорывная волна высотой 70 м захлестнула г. Лонгарон, расположенный в устье р. Вайонт. Ниже по течению р. Пьяве пострадали еще четыре населенных пункта. Менее чем за 7 мин погибли 2 100 человек. Плотина уцелела.

С февраля 1911 г., когда в результате землетрясения в западной части памирского хребта Музкол два с лишним кубических километра раздробленной скальной породы рухнули в долину р. Мургаб, похоронив под собой небольшой кишлак Усой с 54 жителями, существует проблема Сарезского озера. За Усойским завалом уже более 100 лет на высоте 3 239 м плещут волны длинного и глубокого водоема, вместившего в себя 17 км^3 воды.

Угроза? Да еще какая! Возможность нового обвала реальна. Следы былых катастроф на Сарезе свидетельствуют, что и ранее здесь существовали завальные озера, причем более крупные, чем ныне существующее, и все они в конце концов прорвались. Ниже Усойского завала лежат заселенные долины Бартанга, Пянджа, Амударьи.

6.5. Селевые потоки

6.5.1. Проблема

Селевые потоки — одно из самых опасных и распространенных гидрологических явлений в горных странах и вообще в мире больших уклонов. Проблема селей постоянно остается проблемой не только в силу того, что селеведение будет и впредь непрерывно развиваться, но и в связи с особой спецификой самого явления. Во-первых, ими занимаются представители целого спектра наук (гидрологии, геологии, геоморфологии, географии, механики, реологии), а значит, полноценно практически никто. Во-вторых, систематические измерения проходящих селевых потоков и сопутствующих явлений по разным причинам, в том числе и очевидным, никем не проводятся. И, наконец, в-третьих, экспериментальные и полевые исследования селевых потоков требует столь большого финансирования и проявления настолько отчаянного энтузиазма, которые, по крайней мере, в России начала XXI в. недостижимы.

Селевые потоки разнообразны по типу и характеру, но всегда это — горные потоки, состоящие из смеси воды и рыхлообломочной породы. В России принято заимствованное из арабского и тюркского языков слово «сель» (иногда «силь»), хотя слово «сель» на разных языках звучит по-разному. Обычно оно соответствует понятию «грязевой», «грязекаменный поток», но иногда является

и непереводимым: мур, муре (Австрия, Германия), руфф, рюффе (Швейцария), гисс, гиссе (Каринтия в Австрии), цуге (кантон Валлис в Швейцарии), банджир (Ява), сва (Каракорум, Гималаи), уайко (Перу), ямацунами (Япония).

Что же такое сель? Это — горный поток, состоящий из смеси воды и рыхлообломочной горной породы. Возникают селевые потоки во время особо интенсивных ливней или при прорыве моренных озер и других ледниковых водоемов в результате взаимодействия воды и рыхлообломочной породы в ложбинах и ущельях, имеющих большой уклон. Основные признаки селей: внезапность и кратковременность действия.

Соотношение количества твердого и жидкого вещества, которое может быть выражено плотностью смеси, — главное и определяющее свойство потока. Напомним, что плотность воды составляет 1 000 кг/м^3, а плотность вещества горной породы будем полагать равной 2 700 кг/м^3, что приблизительно соответствует действительности в подавляющем большинстве случаев. Плотность селевых потоков колеблется в широком диапазоне — от 1 100 до 2 500 кг/м^3. Наряду с плотностью поведение селевой массы определяется ее составом, т. е. относительным количеством частиц разных размеров.

В зависимости от состава и плотности селевой массы различают три типа селей: наносоводные, грязевые и грязекаменные. Указать точные граничные значения плотности для отдельных типов селевых потоков невозможно, но приближенные «стертые» границы для наносоводных, грязевых и грязекаменных потоков вырисовываются достаточно отчетливо: 1 100—1 500, 1 600—2 000, 2 100—2 500 кг/м^3.

Наносоводный — селевой поток низкой плотности, возникающий при прохождении сильного паводка, срывающий крупнообломочный русловой материал, так называемую самоотмостку, и переносящий большое количество взвешенных и влекомых наносов за счет своей транспортирующей способности.

Грязевой — селевой поток высокой плотности, состоящий из грязи с возможным включением обломков горной породы.

Грязекаменный — селевой поток предельно высокой плотности, состоящий из обломков горной породы, промежутки между которыми заполнены грязью.

Как и другие стихийные явления, селевые потоки вписали многие мрачные страницы в историю борьбы человека с природой. Гибель людей, частично или полностью уничтоженные населенные пункты, разрушенные мосты и дороги, занесенные поля и сады, расходы на ликвидацию последствий вредного воздействия селей и на селезащиту — вот та цена, которую платит человечество за недосмотр, неумение, опрометчивость, за пренебрежение к селевым потокам.

Но не следует воспринимать сели только как враждебное начало. Их существование в природе естественно и целесообразно. Известно, что процессу горообразования противоборствует противоположный ему, называемый *денудацией*. Он объединяет в себе целую группу элементарных процессов, направленных на уничтожение гор и возвышенностей и общее сглаживание поверхности планеты.

Горная порода под совместным воздействием воды, льда, ветра, колебаний температуры, химических и биологических явлений разрушается. Под влиянием силы тяжести продукты разрушения (выветривания) осыпаются вниз и накапливаются в рытвинах, бороздах и понижениях.

В заключение выступают процессы переноса — продукты выветривания перемещаются с гор на равнину под воздействием в первую очередь текущей воды и в меньшей степени льда и ветра. Роль ледниковой эрозии в свое время была сильно преувеличена, многие отложения, традиционно считавшиеся гляциальными, на поверку оказались селевыми. Другое, ставшее классическим, преувеличение связано с водной эрозией, которой всегда отводилась главенствующая роль в процессе денудации. Тем не менее известно, что отдельный селевой поток в небольшом горном бассейне единовременно может вынести столько обломочного материала, сколько его водному собрату, проходящему по тому же руслу, не одолеть и за сотню лет. Значит и в этом случае селевые процессы в большой мере определяют ситуацию, особенно если учесть, что резкое увеличение наносов в реках часто связано с усилением селевой деятельности и что крупные валуны и глыбы, легко и непринужденно выносимые грязекаменными потоками, ручьям и рекам не под силу даже сдвинуть с места.

Таким образом, можно констатировать, не принижая значения других процессов переноса, что природа использует селевые потоки в качестве одного из основных агентов денудации. Поэтому роли селей в истории формирования рельефа и облика земной поверхности, до сих пор недооцениваемой, должны отдать должное.

6.5.2. Селевые очаги

Селевой очаг — морфологическое образование, способное концентрировать сток, вмещающее ПСМ и имеющее достаточный уклон для развития сдвигового или транспортно-сдвигового селевого процесса и для формирования тем самым грязевого или грязекаменного потока высокой плотности.

Генетические типы селевых очагов:

- обводнения;
- взаимодействия.

Селевые очаги обводнения — ложбины в покровных рыхлообломочных породах с обнаженными, задернованными или залесенными склонами или в скальных и полускальных породах, вмещающие ПСМ при углах наклона $\alpha > \alpha_1$ и в которых способен развиваться сдвиговый селевой процесс с формированием селевых потоков высокой плотности.

Селевые очаги взаимодействия — ложбины, врезы, рытвины, русла, тальвеги в покровных рыхлообломочных породах и ложбины и кулуары в коренных породах, вмещающие ПСМ при углах наклона $\alpha_1 > \alpha > \alpha_2$ и имеющие сверху импульсные прорывные водные системы или водосборы, способные формировать паводки с расходами, превышающими их критическое значение.

В этих селевых очагах способен развиваться транспортно-сдвиговый селевой процесс с формированием селевых потоков высокой плотности.

Ландшафтные типы селевых очагов:

действующие (с видимыми следами селевой деятельности):

- селевые обнажения;
- селевые врезы;
- селевые рытвины;

потенциальные (без видимых следов селевой деятельности):

- залесенные селевые ложбины;
- задернованные селевые ложбины;
- селевые ложбины с осыпными и курумными склонами;
- селевые ложбины в скальных и полускальных массивах;
- селевые ложбины на уступах морен.

Селевые обнажения — морфологические образования, возникшие в результате сноса почвенно-растительного покрова и рыхлообломочной породы при сдвиговом селевом процессе в случаях, когда подстилающие скальные породы или относительный водоупор, совпадающий с поверхностью скольжения, залегает неглубоко и днища ложбин достаточно широки («плоский» ПСМ):

$$МФ = (0{,}01 \div 0{,}06)(1 \div 15).$$

Селевые врезы — мощные морфологические образования, выработанные обычно в толще древних моренных отложений и чаще всего приуроченные к резким перегибам рельефа; возникают в результате проявления сдвигового и транспортно-сдвигового селевых процессов.

Глубина измеряется несколькими десятками метров:

$$МФ = (0{,}4 \div 0{,}8)(1 \div 15).$$

Селевые рытвины — линейные морфологические образования, прорезающие элювиально-делювиальные рыхлообломочные отло-

жения. Возникают также в результате проявления сдвигового и транспортно-сдвигового селевых процессов:

$$\text{МФ} = (0{,}4 \div 0{,}8)(15 \div 100 \text{ и более}).$$

Морфометрическая формула — краткий способ записи морфометрических соотношений селевых очагов:

$$\text{МФ} = (H/B)(L/B),$$

где H, B и L — соответственно средняя глубина, средняя ширина по верху и длина морфологического образования.

Полное наименование ландшафтного типа действующего селевого очага строится по примеру следующих: «обнажение в залесенной ложбине», «врез на уступе морены», «рытвина в скальном кулуаре».

Типы потенциально-селевых массивов (ПСМ). Различают четыре типа ПСМ:

- обводнения;
- взаимодействия;
- вовлечения;
- аллювиальный, пролювиальный или аллювиально-пролювиальный.

ПСМ обводнения и ***взаимодействия*** соответствуют одноименным селевым очагам.

ПСМ вовлечения — скопления рыхлообломочной породы по пути движения уже сформировавшегося селевого потока высокой плотности, способные к вовлечению в этот поток.

Аллювиально-пролювиальный ПСМ — скопление более или менее окатанного обломочного материала в руслах малых горных и предгорных рек и временных водотоков (аллювий — отложения постоянных водных потоков, пролювий — то же, но временных).

Селевые водосборы и водосборы селевых очагов. Селевой водосбор — краткое наименование бассейна, содержащего стокообразующие поверхности и способные сформировать наносоводный селевой поток. Обычно — это водосборы поверхностного стока.

Водосбор селевого очага — часть селевого бассейна, принимающая непосредственное участие в питании селевого очага водой. В их пределах может формироваться как поверхностный, так и почвенный, и грунтовый сток.

Комментарий

Пользуясь предложенными понятиями, терминами и определениями, можно не только более четко описать ту или иную территорию с точки зрения ее пораженности видимыми селепроявлениями, но и оценить потенциальные возможности зарождения селей редкой повторяемости, а также более удобно и обоснован-

но проводить необходимые расчеты. В частности, каждому из типов селевых процессов соответствует своя математическая модель с набором специфических параметров.

6.5.3. Селевые процессы

Традиционная формула, присутствующая почти во всех публикациях о селевых потоках, гласит, что для образования последних необходимо сочетание трех условий: наличия рыхлой горной породы, воды и уклона. Возникает вопрос: какой уклон является достаточным для образования селей? Различный для разных типов селевых процессов и потоков.

В основе понимания сущности селевых процессов лежит соотношение между напряжениями, пытающимися привести обломочную породу в движение и препятствующими этому. Будем иметь в виду массив влажной рыхлообломочной породы (потенциальный селевой массив — ПСМ), подтопленный стекающей водой на определенную глубину. Ниже использованы следующие обозначения: ρ_0, ρ — плотности воды и вещества горной породы, кг/м^3; ε, ε^*, θ (безразмерные величины) — статическая и динамическая пористость и объемная влажность рыхлообломочной породы; h — толщина ПСМ над коренными породами или относительным водоупором, м; β — относительная (в долях h) глубина подтопления ПСМ; φ, φ^*, C — статический и динамический углы внутреннего трения, град, и сцепление, Па, рыхлообломочной породы, затопленной водой; α — угол наклона ПСМ, град; σ (+), σ (–) — сдвигающее и удерживающее напряжения, Па; g — ускорение свободного падения, м/с^2. Тогда

$$\sigma(+) = gh[\rho(1-\varepsilon) + \rho_0\theta(1-\beta) + \rho_0\varepsilon\beta]\sin\alpha; \tag{6.3}$$

$$\begin{aligned}\sigma(-) = gh\{&(1-\beta)[\rho(1-\varepsilon) + \rho_0\theta] + \\ &+\beta(\rho-\rho_0)(1-\varepsilon)\}\cos\alpha\,\mathrm{tg}\,\varphi + C.\end{aligned} \tag{6.4}$$

При решении этих уравнений относительно угла наклона при $\beta = 1$ (полное затопление породы) и $C = 0$, что отвечает экстремальным ситуациям (возникновение трещин, сейсмические воздействия), получим значение первого критического уклона:

$$\mathrm{tg}\,\alpha_1 = (\rho-\rho_0)(1-\varepsilon)\,\mathrm{tg}\,\varphi/[\rho(1-\varepsilon) + \rho_0\varepsilon]. \tag{6.5}$$

Если иметь в виду, что обломочная порода уже каким-то образом приведена в движение, то следует определить минимальный угол наклона α_2, при котором порода еще будет двигаться. В этом случае в уравнении (6.5) статические величины пористости ε и угла внутреннего трения φ должны быть заменены динамически-

ми — ε^* и φ^*. Таким образом, для толщи породы с данными свойствами определены критические углы наклона α_1 и α_2, разбивающие весь диапазон уклонов на три интервала, каждый из которых отвечает возможности проявления своего типа селевого процесса — транспортного, сдвигового и транспортно-сдвигового.

Транспортный селевой процесс ($\alpha < \alpha_2$). Ливневые паводки и наносоводные потоки — «кровные родственники». Каждый паводок, если он по своим размерам превосходит определенную границу, связанную с его способностью сорвать русловую валунную самоотмостку и тем самым привести в массовое движение обломочный материал, слагающий русловое ложе, становится селевым. Транспортирование влекомых наносов — это движение обломочной породы за счет энергетических затрат потока водной суспензии, притекающей в русло с окружающих склонов. Элементарная мощность, которую следует затратить на передвижение расхода твердого материала, определяется уравнением

$$n = gG(\rho - \gamma_0)\,\mathrm{tg}\,\varphi^*\cos\alpha,$$

а элементарная потенциальная мощность потока суспензии, т.е. все то, чем этот поток располагает в энергетическом плане,

$$n_1 = g\gamma_0 Q_0 \sin\alpha,$$

где Q_0 — расход потока мутной воды (суспензии) плотностью γ_0; G — расход влекомых наносов.

Не следует забывать, что лента аллювия или пролювия на наклонном ложе и сама способствует своему движению:

$$n_2 = g(\rho - \gamma_0)G\sin\alpha.$$

На поддержание этого движения расходуется определенная часть c_1 элементарной потенциальной мощности. Тогда выражение для расхода влекомых наносов при развитом транспортном селевом процессе будет иметь вид

$$G = c_1 \frac{\gamma_0\,\mathrm{tg}\,\alpha}{(\rho - \gamma_0)(\mathrm{tg}\,\varphi^* - \mathrm{tg}\,\alpha)} Q_0; \quad Q_0 \geq Q_{кр}.$$

Здесь $c_1 < 1$, $Q_{кр}$ — критический расход. При анализе взаимодействия водного потока и аллювия важное значение приобретает понятие «критический расход», т.е. расход воды или суспензии, обеспечивающий сдвиг практически всех элементов ПСМ.

Сдвиговый селевой процесс ($\alpha > \alpha_1$). Обломочная порода заполняет ложбину, угол наклона которой превышает первый критический. При обводнении ПСМ в его толще возникает поток грунтовых вод, относительная глубина которого β в известной мере контролирует ситуацию. Возможность сдвига ПСМ, и следователь-

но, формирование грязевого или грязекаменного селя определяется переходом его величины β через ее критическое значение. К последнему приводит совместное решение уравнений (6.3) и (6.4) относительно β при $\sigma(+) = \sigma(-)$:

$$\beta_{кр} = \frac{[\rho(\varepsilon - 1)/\rho_0 + \theta](\operatorname{tg}\varphi/\operatorname{tg}\alpha - 1) + C/(g\rho_0 h \sin\alpha)}{(\varepsilon - \theta) + [1 - (\varepsilon - \theta)]\operatorname{tg}\varphi/\operatorname{tg}\alpha}.$$

Сравнение текущего и критического значений β позволяет оценить ситуацию, насколько реальна угроза развития сдвигового селевого процесса, возможность проявления которого отображается неравенством $\beta > \beta_{кр}$.

Проявления сдвигового селевого процесса многообразны. Местные природные условия — тип рельефа, характер почв и растительности, состав и свойства горных пород, особенности гидрографии — придают ему многие специфические черты.

В ложбинах и кулуарах, заполненных продуктами разрушения, поступающими с окружающих скальных или полускальных гряд и массивов, во время выдающегося ливня первая подвижка ПСМ обычно происходит в их верхней части, где мощность породы ниже, сама ложбина у́же, уклон значительнее. Сдвиговый селевой процесс часто захватывает уступы древних и современных морен. Формирование ПСМ здесь связано с протаиванием мерзлой моренной толщи под влиянием тепла, выделяемого стекающей водой. Непосредственной причиной возникновения грязекаменного потока чаще всего служат случайные изменения путей фильтрации воды с тающих ледников. Дополнительное силовое воздействие на протаявший ПСМ оказывает сам фильтрационный поток.

Многие горные районы, покрытые лугами и лесами, обычно не относят к селеопасным, хотя имеются многочисленные примеры возникновения селевых потоков и в такой местности.

Как зарождается сель? Попробуем дать обобщенную картину.

Лето выдается дождливым. Сильные и моросящие дожди сменяют друг друга. Почва обильно напоена влагой. И вот в довершение всего на склоны гор обрушивается ливень. Грунтовая толща насыщается, тяжелеет, особенно вдоль тальвегов, по низинам. И вдруг где-то там, в ее недрах, происходит то, что мы на бумаге изобразили неравенством $\beta > \beta_{кр}$. Неожиданно раздается утробный чавкающий звук, как бы глубокий вздох земли, и с этого момента события развертываются с головокружительной быстротой. Вздрагивает громадный участок склона — центральная часть широкой ложбины. Молниеносно пробегают зигзаги трещин. Чудится какое-то неестественное шевеление, и уже мелькают отдельные земляные блоки с нетронутой луговой поверхностью или кустами, или с уже падающими деревьями, верхушки которых выписывают замысловатые траектории. Следующий миг! Колышущаяся грун-

товая масса, клочья трав, ветки и обломки древесных стволов. Еще мгновение! И уже оползает и осыпается мокрая порода по свежим откосам вырванной в склоне хребта как бы дымящейся глубокой ниши. А внизу, непрерывно меняя очертания, несется вал грязевой плазмы, как кара небесная ворвавшийся в зеленую долину.

Своеобразен вариант, когда ПСМ сложен продуктами разрушения таких пород, как мергели или глинистые сланцы. В этом случае при увлажнении он приобретает пластические свойства. У основания крутых разрушенных склонов на дне ложбин с относительно небольшим уклоном (12—20°) в результате осыпания и обваливания горной породы, мелких оползней и селевых потоков постепенно нарастает мощность ПСМ, который может достигать десятков метров ширины и километровой длины. Если толща обломочной породы достигает определенных мощности и увлажнения, то в теле ПСМ начинается пластическая деформация. Скорость движения при этом невелика, сантиметры в час, но деформация приводит к разрыхлению породы. Это известный факт: рыхлая сыпучая среда при сдвиге уплотняется, а плотная, наоборот, разрыхляется.

В обоих вариантах достигается одна и та же пористость, которая в грунтоведении получила название критической. Если в это время выпадет сильный ливень, то деформация усиливается, на фронте ПСМ движение ускоряется и вдруг внезапно ПСМ начинает «изливаться». При этом фронт неподвижного ПСМ пятится назад, и вверх по «камнегрязехранилищу» бежит волна возмущения, а грязекаменная масса в виде селевого потока устремляется вниз по долине.

Расход излияния пластического ПСМ зависит от его мощности и ширины и приближенно может быть оценен формулой

$$Q_c = c_2 h^{3/2} B,$$

где h и B — мощность и ширина ПСМ; c_2 — коэффициент, $м^{0,5}/с$, по величине видимо близок к единице.

Транспортно-сдвиговый селевой процесс ($\alpha_1 \geq \alpha \geq \alpha_2$). Этот процесс естественным образом занимает полагающееся ему место на иерархической лестнице селевых явлений, в основу которой положено соотношение степени активности воды и горной породы в селеобразовании. Ниже использованы следующие понятия и обозначения:

расстояние вдоль селевого вреза — x, м;

расстояние от входа во врез до начала очередного расчетного участка — x_0, м;

плотность вещества горной породы, слагающей ПСМ в селевом врезе, — ρ, $кг/м^3$;

пористость рыхлообломочных отложений ПСМ — ε;

объемная влажность рыхлообломочных отложений ПСМ — θ;

относительная влажность рыхлообломочных отложений ПСМ — $\zeta = \theta/(1 - \varepsilon)$ (отношение объемной влажности к объему твердого вещества);

расход воды, поступившей в селевой врез, — Q, м^3/с;

критическое значение расхода воды, превышение которого влечет за собой развитие транспортно-сдвигового селевого процесса — $Q_{кр}$, м^3/с;

расход твердой составляющей селевого потока — G, м^3/с;

отношение расхода твердого вещества к расходу воды — $N = G/Q$;

расход селевого потока, м^3/с:

$$Q_c = [1 + (1 + \zeta)N]Q;$$

плотность селевого потока, кг/м^3:

$$\gamma_c = [\rho_0 + (\zeta\rho_0 + \rho)N]/[1 + (1 + \zeta)N];$$

плотность селевой массы на пределе текучести — $\gamma_{пт}$, кг/м^3;

элементарная потенциальная мощность потока — его способность произвести определенную работу на единице пути за единицу времени:

$$n = g \sin\alpha[Q\rho_0 + (\zeta\rho_0 + \rho)G];$$

выражение, обратное значению коэффициента устойчивости ПСМ, затопленного водой:

$$K = [\rho(1 - \varepsilon) + \rho_0\varepsilon]\operatorname{tg}\alpha/[(\rho - \rho_0)(1 - \varepsilon)\operatorname{tg}\varphi];$$

коэффициент текучести селевой массы

$$R = (\gamma_{пт} - \gamma)/(\gamma_{пт} - \rho_0).$$

В предположении, что приращение расхода твердого материала, вовлекаемого в селевой поток по мере его продвижения вдоль селевого вреза, пропорционально трем последним величинам, получим

$$dG/dx = c_3 nKR, \quad Q \geq Q_{кр}.$$

Эмпирический коэффициент $c_3 = (3 \div 5)10^{-6}$ м · с^2/кг.

Это уравнение не может быть решено относительно N в явной форме, поэтому приходится прибегать к процедуре последовательного приближения.

Таким образом, выше были постулированы возможности потока обогащаться твердым материалом по пути своего следования. Очевидно, что эти возможности связаны с податливостью затопленной водой рыхлообломочной породы на сдвиг (отображено величиной K) и с мощностью, которой располагает поток в каждой точке своего пути (n). Коэффициент K как величина обратная

коэффициенту устойчивости определяется отношением σ (+) к σ (–) при β = 1 и может изменяться от 0 до 1 (при $K > 1$ сдвиг породы происходит и без помощи потока).

С увеличением плотности, а следовательно, снижением «текучести» потока его размывающая способность падает, что и достигается введением коэффициента R. Он изменяется от 0, когда плотность достигает предела текучести, до 1 при $\gamma = \rho_0$ (водный поток).

Судьба водного потока, попавшего в селевой очаг, в сильнейшей мере зависит от влажности ПСМ. Возможны три характерных случая: $\zeta_1 = 0$ (сухой ПСМ), $\zeta_2 = \zeta_{пт}$ (ПСМ увлажнен до предела текучести) и $\zeta_3 = \varepsilon/(1 - \varepsilon)$ (пористость ПСМ заполнена водой). Случай 1 отвечает постепенному затуханию, 2 — стабильности и 3 — лавинообразному развитию процесса, которое может ограничить только резкое уменьшение уклона или отсутствие ПСМ.

Исключительно по своему воздействию на активность транспортно-сдвигового селевого процесса совместное влияние уклона и предварительного увлажнения ПСМ. Моделирование селевого потока на выходе из селевого очага или в зоне транзита позволяет получить «гладкий» гидрограф, соответствующий характеру гидрографа водного потока на входе в селевой очаг. В действительности в селевом очаге и особенно транзитном русле господствуют механизмы (борьба нелинейности с дисперсией), приводящие к возникновению цуга солитонов — серии катящихся волн или валов, выстроившихся в убывающем порядке. Теория солитонов, развитая на базе уравнения Кортевега — де Фриза, позволяет получать аналитические решения и преобразовать «гладкий» гидрограф в «солитонный». Что касается оценки максимального расхода передового вала, то это достигается простым умножением «гладкого» максимума на коэффициент, в первом приближении равный 2,5.

Грязевые и грязекаменные потоки, поступающие из селевых очагов в долины с углами наклона $\alpha < \alpha_2$, тормозятся и разгружаются.

6.5.4. Движение селевых потоков высокой плотности

Существующие методы расчета скоростей движения селевых потоков обычно не учитывают свойства и особенности селевой массы, а они могут быть чрезвычайно разнообразными.

Ниже целесообразно использовать следующие понятия:

- обломочный материал (синонимы: сыпучее твердое тело, гранулированная среда) — смесь глыб, валунов (камней), гальки (щебня), гравия (дресвы), песка в любых сочетаниях;
- пластичная плазма — смесь воды и мелкозема (пыль, глина, коллоиды, т.е. частицы размером менее 0,1 мм) в диапазоне плотности между пределами пластичности и текучести;

• структурная плазма — смесь воды и мелкозема в диапазоне плотности между пределами текучести и сохранения структуры;

• суспензия — смесь воды и мелкозема в диапазоне плотности ниже предела сохранения структуры.

В качестве параметров селевой массы полезными являются:

• объемная доля плазмы или суспензии в селевой массе;

• плотность обломочной массы на пределах подвижности и существования непосредственных контактов между обломками;

• плотность плазмы на пределах пластичности, текучести, сохранения структуры;

• коэффициент сопротивления относительному перемещению элементов обломочного материала («вязкости» гранулированной среды) на пределах подвижности и существования непосредственных контактов между обломками;

• коэффициенты вязкости воды и плазмы на пределах пластичности, текучести и сохранения структуры;

• предельное напряжение сдвига на пределах пластичности, текучести и сохранения структуры;

• коэффициенты сопротивления перемешиванию обломочной массы на пределах подвижности и существования непосредственных контактов между обломками, плазмы на пределах пластичности, текучести и сохранения структуры.

Примем подходящий вид реологического уравнения (соотношения между напряжением и скоростью деформации), среди коэффициентов которого фигурируют следующие характеристики селевой массы: плотность γ_c, динамический угол внутреннего трения φ^*, коэффициенты динамической вязкости μ и сопротивления перемешиванию β:

$$g\gamma_c y(\sin\alpha - \cos\alpha \operatorname{tg}\varphi^*) = \mu d\vartheta/dy + \gamma_c(\beta H)^2(d\vartheta/dy)^2, \qquad (6.6)$$

где g — ускорение свободного падения; α — угол наклона русла; y — расстояние от дна; H — глубина потока; ϑ — скорость течения.

При ламинарном режиме течения основную роль играет первый член правой части уравнения (6.6), при турбулентном — второй. В реальной грязекаменной массе в зависимости от уклона, глубины и скорости течения возможны оба режима, поэтому есть смысл отказаться от априорного выбора частной модели.

Решение уравнения (6.6) относительно градиента скорости дает

$$d\vartheta/dy = (1/H)[(M/H)^2 + Ny]^{1/2} - M/H^2. \qquad (6.7)$$

Для снижения громоздкости записей здесь и ниже использованы обозначения:

$$M = \mu/(2\gamma_c\beta^2); \quad N = g(\sin\alpha - \cos\alpha \operatorname{tg}\varphi^*)/\beta^2.$$

Из простого дифференциального уравнения (6.7) получены следующие выражения для скоростей течения грязевого или грязекаменного потока — на глубине y и максимальной (поверхностной):

$$\vartheta(y) = (2/3NH)[(Ny + M^2/H^2)^{1,5} - (M^3/H^3)] - My/H^2;$$

$$\vartheta_{max} = [2/3NH][(NH + M^2/H^2)^{1,5} - M^3/H^3] - M/H.$$

Сопротивление движению грязекаменного потока оказывает внутреннее трение. Под этим следует понимать противодействие среды, возникающее при относительном перемещении отдельных элементов селевой массы. Доминирующую роль здесь играют деформации, связанные с относительным проскальзыванием и соударением камней разного размера. В движущемся потоке, особенно в голове его, камни и глыбы часто образуют замкнутые группы, скользящие в данный момент времени относительно друг друга, чтобы чуть позже образовать новые группы. Происходит как бы непрерывная переупаковка камней и обломков. В реологическом уравнении, так же как и в выражениях для скоростей течения, три показателя отображают различные стороны проявления внутреннего трения в селевой массе — коэффициенты динамической вязкости μ, сопротивления перемешиванию β и угол внутреннего трения φ.

Коэффициент вязкости отображает трение при скольжении отдельных слоев и элементов селевой массы друг по другу. Чем крупнее включения, тем сильнее они взаимодействуют и проникают в соседние слои и тем больше энергии рассеивают. Понятие вязкости мы привыкли относить к жидкостям. Оставим ее определение без изменений, но будем иметь в виду взаимодействие уже не молекул, а гранул и обломков. Единственным условием приемлемости такого подхода, кроме некоторой условности, выступает необходимость рассматривать достаточно большую массу обломочного материала, так как понятие «вязкость» статистично по своей природе.

Коэффициент сопротивления перемешиванию представляет собой среднее относительное расстояние, на которое перемещаются элементы селевой массы в направлении, перпендикулярном продольной оси селевого потока, прежде чем вовлечься в общее продольное движение. Для водного потока — это относительный «путь смешения», т.е. среднее расстояние поперек потока (в долях от его глубины), на которое успевают переместиться элементарные вихри до того, как исчезнуть.

Представляется очевидной закономерность убывания роли вязкости с увеличением глубины потока. Если в метровом слое селевой массы вязкость полностью диктует свои условия, то в 100-метровой толще ее влияние уже многократно меньше.

Перечисленные параметры селевой массы должны быть определены, обобщены и систематизированы в зависимости от гранулометрических и петрографических свойств обломков, наличия и типа глинистых минералов и степени разжижения рыхлообломочной горной породы водой, т.е. от плотности и свойств селевой массы.

6.5.5. Лахары

Особое место среди селей занимают потоки вулканического происхождения, получившие даже специальное наименование «лахары». Размеры и мощность лахаров могут быть грандиозными, в движении могут участвовать десятки и сотни миллионов кубических метров грязевой и грязекаменной массы. Селевые потоки на склонах вулканических конусов формируются при излиянии кратерных озер, при стремительном таянии снега и льда во время извержений, при переходе пирокластических потоков, состоящих из очень подвижной смеси обломочного материала и раскаленных газов, в лахары, когда существуют условия обводнения (катастрофическое снеготаяние, реки), при выпадении интенсивных ливней, особенно сразу после извержения. В вулканических районах опаснее не сами извержения, а вызванные ими лахары.

Вулкан Келуд на острове Ява за 100 лет породил 27 лахаров. Особо известно извержение 1919 г., когда 38 млн $м^3$ воды было выплеснуто на склоны вулкана. Горячие лахары покрыли грязекаменной массой 131 $км^2$ территории. Объем отложений оценивается различными цифрами вплоть до 100 млн $м^3$.

В 1956 г. при взрыве вулкана Безымянный на Камчатке катастрофически быстро стаял снежный покров и образовался гигантский лахар, прошедший по рекам Сухая и Большая Хапица (путь в 90 км) до реки Камчатки. Общий объем отложений составил не менее 500 млн $м^3$.

Малайский архипелаг, Филиппины, Япония, Камчатка, Каскадные горы в Северной Америке (например, лахары вулкана Сент-Хеленс в 1980 г.), Анды Южной Америки (например, лахары вулкана Руис в 1985 г., уничтожившие городок Армеро), Исландия, Новая Зеландия — вот территории, подверженные воздействию лахаров.

6.5.6. Сель идет!

Сель идет! Если звучат эти слова, то реакция на них всегда бывает однозначной — бегство. И редко кто находит в себе физические и душевные силы подробно рассмотреть само явление. Мы

знаем по себе, как, даже находясь в относительной безопасности, трудно не попасть под гипнотическое воздействие стихии.

Вот как описывает банджир (яванское наименование селя) в одном из своих рассказов Эдуард Дауэс Деккер, прозвавший себя Мультатули и посвятивший свое творчество Индонезии:

«Все смолкло. Все прислушалось. Все завопило...

Банджир!

Как описать мне могучий паводок в горах! С чем сравнить этого водяного исполина, который уносит все, что ему противостоит, сгибает деревья, как соломинки, сводит с лица земли целые леса! О, это естественно, что все народы сохранили воспоминания о могучих потоках младенческой поры своей истории!

Слышимый вначале глухой шорох призывает к бдительности, и кто ему внимает поэтическим слухом сердца, отчетливо распознает в нем призыв к молитве. Этот призыв все народы младенческой стадии развития переводили словами: слушайте, как говорит Бог!..

Банджир! Земля дрожит, воздух сгущается так, что трудно дышать, в ушах гудит, словно все звуки соединились в единый гул, который можно было бы уподобить гигантскому «Р», если бы описать этот звук было мыслимо.

Вода не поднимается, она уплотняется, накапливается. Ее видят перед собою, напротив себя, словно это стена, движущаяся по равнине...

Долой все, что является препятствием, все, что обращается в бегство! Против этой силы нет другой силы, с этой скоростью не поспорит ничья скорость! Долой людей и животных..., долой растения, деревья, сады, леса..., все долой, все срезано, смыто, скошено, сглажено!

Но эта ярость недолговечна. Она слишком огромна для этого. В оставшемся от наводнения иле скоро будут найдены обломки разрушения и трупы всех, что были умерщвлены».

Приведем краткую сводку некоторых словесных зарисовок очевидцев такого редкого явления, как движение грязекаменного потока.

1. Ручьи Тезтор и Адыгене (бассейн р. Алаарча, северный склон Киргизского хребта), 22 июня 1953 г. Поток возник в результате прорыва моренного озера. Объем 80 тыс. м^3, расход при прорыве 50 м^3/с. Объем потока около 300 тыс. м^3. Объем переносимых валунов до 25 м^3. Описание А. Н. Крошкина:

«...Селевой поток, передвигаясь волнообразно и отдельными валами, представлял сплошную серую массу консистенции хорошо размешанного строительного раствора, состоящего из воды, валунов, булыг, галечника, песка и мелкозема... Селевые валы высотой до 3—4 м на прямолинейных участках и до 6—8 м на изгибах русла с максимальным расходом 400 м^3/с характеризова-

лись чрезвычайной бурностью (турбулизированностью) и волнообразованием, имеющим высоту грязекаменных волн до 2—2,5 м. Галечник и отдельные булыги выбрасывались потоком с шумом и грохотом на расстояние 5 м и более от русла реки; над потоком клубился туман из воды, грязи и твердых частиц. Крупные валуны перемещались относительно друг друга в вертикальном и горизонтальном направлениях, причем послойного движения не наблюдалось».

2. Хит-Каньон близ Райтвуда (северный склон гор Сан-Габриель, 68 км к северо-востоку от Лос-Анджелеса, Калифорния), 11—12 мая 1941 г. Потоки возникли в результате интенсивного снеготаяния и обводнения продуктов разрушения, кристаллических сланцев. Объем серии потоков 920 тыс. м^3. Диаметр наиболее крупных камней около 1,8 м, плотность селевой массы 2400 кг/м^3. Описание Р. П. Шарпа и Л. Х. Ноублса:

«...Вал создавал шум, подобный грохоту бетона в бетономешалке. Сталкивающиеся валуны сотрясали землю, были слышны всплески жидкой грязи... Фронт передней жидкой волны плавно скользил и был пологим подобно фронту быстро текущей воды и напоминал волны прибоя, наступающие на морской берег. Однако накатывание волны с перегибом гребня, как это наблюдается для волны прибоя, в данном случае было выражено плохо, тем не менее, гребень волны стремился накрыть и опередить ее отставание. Нечетко выраженный накат воды с перегибом гребня, вероятно, частично обязан сглаживанию русла предшествующими потоками. Валуны как бы облицовывали фронт более вязких волн и здесь катились, крутились и скользили, но, как правило, не опережали основание волны. Их движение осуществлялось благодаря воздействию более мелких обломков, движущихся позади валунной дамбы, и они скользили по грязи, текущей между ними. Высота переднего края волн изменялась от нескольких дюймов до 4,5 футов (1,4 м)... По мере того как материал становился более вязким, особенно в поздней стадии активности, скорости уменьшались, и валунный фронт становился плотнее, круче и выше... Брызги грязи подлетали на высоту 20 футов (6 м), и наблюдатели на берегу были ею забрызганы... Временами материал становился настолько вязким, что брошенные в него камни не поднимали брызг и медленно тонули».

3. Верховья ущелья Мэйфлауер (западный склон хребта Тенмил, 100 км к западо-юго-западу от Денвера, Колорадо), 18 августа 1961 г. Потоки возникали на склонах цирка крутизной 35—41° в результате сильного ливня и остановились на уклоне 7,5—12°. Описание Р. Р. Карри, наблюдавшего явление со склона цирка с расстояния около 900 м:

«...Послышался сильный грохот, перекрывший раскаты грома. Группа обвальных лавин появилась в четырех различных точках на

склоне в верхней части цирка... Даже несмотря на то, что осыпи были пропитаны 48-часовым интенсивным дождем, большие облака каменной или водяной пыли сопровождали это появление... Отдельные потоки представляли собой серию языкообразных валов, движение которых для самого крупного объекта продолжалось около одного часа. Этот поток состоял из 10 более или менее различных волн, каждая из которых двигалась с максимальной поверхностной скоростью 15—16 м/с вблизи центра потока на высоте 3750 м. Скорость волн потока падала до 1 м/мин и менее, когда он выходил на дно долины... Создалось впечатление, что волны потока являются результатом спускового эффекта ударной волны, проходящей по конусу осыпи, лежащей под углом естественного откоса, и что в верхней части грязекаменного потока действительная скорость сплавляемых валунов может быть значительно ниже, чем наблюдаемая скорость фронта потока... Отдельные угловатые валуны с максимальным диаметром 0,8 м и весом более 340 кг появлялись на поверхности потока. Наиболее крупные валуны были отмечены около вершины наружного края подвижного фронта каждой волны... Прокатывание вниз под фронт волны, как это имело место в случае, описанном Шарпом и Ноублсом для райтвудских потоков, не наблюдалось, скорее осыпь сдвигалась перед волной в мореноподобную гряду, которая затем включалась в состав фронтального вала».

4. Каутс-Крик (бассейн р. Нискуэлли, массив Рейнир, Тихоокеанский северо-запад США, Вашингтон), 2 октября 1947 г. Поток возник в результате выпадения ливня на ледник и последующего прорыва дождевых и талых вод. Объем потока 38 млн м^3, средняя плотность селевой массы 2000 кг/м^3 (видимо, без учета глыб и камней). Описание Р. К. Грейтера, наблюдавшего поток в 8,8 км ниже оконечности ледника Каутс:

«Огромное веерообразное море обломков горной породы и бревен устремилось через шоссе к реке Нискуэлли. Сила движущейся массы была столь ужасающей, что громадные валуны стремительно проносились ею как плавучий материал... В большинстве случаев эти валуны не катились, а просто двигались, поддерживаемые на поверхности этой гущи цементно-подобного материала, текущей через участок. Деревья, одно больше другого, диаметрами, превышающими три фута (около метра), были сломаны, как палки, или были вырваны с корнем. Все это сопровождалось грохотом и дрожанием земли, что наводило ужас... Материал, перемещаемый потоком, конечно, не был водой, по консистенции он был похож на хороший бетон... Достигая глубины в несколько футов, он (поток) медленно тек, вынося с собой огромные валуны, диаметр которых порой достигал 13 футов (около 4 м)».

5. Факон (бассейн р. Ибей, притока Дюранс, 4 км выше Барселоннет, хребет Парпайон в Котских Альпах, Франция), 13 авгу-

ста 1876 г. Селевой поток возник в результате выпадения ливня. Объем потока 234 тыс. $м^3$, плотность 2 190 $кг/м^3$. Описание Шлюмбергера, наблюдавшего поток в месте выхода последнего на конус выноса, получило широкую известность среди селевиков и цитировалось неоднократно; впервые приведено в руководстве по облесению гор П. Демонце, переведенном на русский язык в Тифлисе в 1891 г.:

«...Я увидел огромную черную массу, которая двигалась словно стена, почти без шума спускаясь по руслу. Это был сель, вышедший из гор, который мне удалось наблюдать во всей его силе. Этот сель, быстро продвигавшийся на больших уклонах, скоро появился недалеко от меня, перемещаясь по местности с уклоном не более 0,12 (7°). Его скорость тут же снизилась и скоро не превышала 1,5 м/с. Это была смесь земли и каменных обломков всевозможных размеров, жидкая, как бетон. Перед собой поток двигал целый авангард больших глыб, иногда 5—6-кубометрового объема, наполовину погруженных в очень густую грязь... При малейшем препятствии передовые глыбы... останавливались. Но поток напирал сзади, и уровень селя тогда высоко поднимался (до 7 м над дном русла)... Вся масса вновь приходила в движение до следующей остановки... Как только передовой отряд больших глыб прошел, остальная часть потока двигалась в русле довольно упорядоченно. Это была масса черного цвета, едва жидкая...

Можно было сказать, что это была река грязи. Только временами крупные глыбы заявляли о своем присутствии в селе, поднимаясь на секунду, как башни, среди грязевого потока, чтобы сейчас же снова в нем исчезнуть, как только будет пройдено препятствие, заставившее их подняться вверх... Поперечный профиль потока становился выпуклым, когда уровень поднимался, и слегка вогнутым, когда он падал... Не слышно было почти никакого шума, исключая раздававшийся время от времени скрежет камней о русло или о другие камни. Но поток делался все более и более жидким и двигался с возрастающей скоростью. Скоро вода появилась в изобилии: она яростным ручьем текла поверх селя, двигавшегося более медленно. Тут начался шум... Сель... мог развернуться на обширном конусе выноса. Он расплылся вширь... и движение его сильно замедлилось. Наиболее крупные глыбы, бывшие скрытыми в потоке, касались дна и мало-помалу останавливались, тогда как некоторые поменьше продолжали двигаться, вращаясь, и время от времени показывались из грязи; часто было видно, как они некоторое время плавали, как куски дерева по воде...».

6. Саньер (район селения Жозье, в 3—4 км вверх по р. Ибей от Факона), 8 августа 1876 г. Поток возник при выпадении ливня.

Описания Зефирена Доля, Жана Бегю и Фирмена Одиффре, имевших отношение к строительству противоселевых запруд, также приведены у П. Демонце:

«...Раздался глухой шум, похожий на грохот, создаваемый артиллерийской колонной, проходящей рысью по мостовой... Затем стало возможным различать, кроме грохота, еще отдельные удары от столкновения налетавших одна на другую глыб. Несколько секунд спустя я увидел сель ужасного вида, который появился в 50 м выше запруды № 7. Он был высотой в 7—8 м и состоял из обломков разных размеров, постоянно сталкивающихся между собой... Я заметил, как и все рабочие, что барак двинулся раньше прибытия селя; ему оставалось до него еще 3—4 м, насколько расстояние позволило это рассмотреть... Рабочие, между прочим, объявили мне, без всякого вопроса с моей стороны, что они видели, как довольно тяжелые сани..., сильно нагруженные камнями, перевернулись еще тогда, когда голова селя находилась от них в нескольких метрах...

Я прекрасно видел, что эта хижина была снесена в момент, когда голова колонны селя находилась от нее еще в нескольких метрах... Я увидел, что приближаются крупные глыбы камней, поднявшихся почти отвесной стеной 5-метровой высоты...

Я видел довольно много камней размером поменьше кулака, выброшенных в воздух на 15 м ... Впереди это была куча крупных глыб, спускавшихся, вращаясь, друг около друга. Это движение производило страшный грохот, к которому иногда присоединялся треск, как бы от дерева, вырванного бурей с корнем. Эта куча глыб, промежутки между которыми были заполнены грязью, имела в длину 3—4 м. Голова селя образовала наклонную плоскость в 2—2,5 м высотой».

7. Куро (бассейн р. Терек, северный склон Главного Кавказского хребта, район селения Казбеги), 8 августа 1955 г. Селевой поток возник при выпадении трехтактного ливня. Максимальный расход 52 $м^3/с$, объем 562 тыс. $м^3$, плотность 2 100 $кг/м^3$.

Описание В. Е. Иогансон:

«...Сель появился... из-за поворота русла в виде вала высотой порядка 1—1,5 м. Он представлял собой густую грязь, включающую камни диаметром до 1 м, реже встречались валуны диаметром 2 м и более. Движение шло волнами; спады чередовались с новыми грязекаменными валами. Временами, когда двигалась большая масса крупных камней, поверхность потока становилась выпуклой. Более крупный материал постепенно отжимался к берегам и откладывался, затем вновь подхватывался очередным валом. При этом поверхность потока напоминала реку, наполненную как бы шугой черного цвета... На поворотах и в сужениях поток постоянно создавал заторы, которые быстро прорывались; скорость его при этом возрастала до 3—5 м/с. Прорвавшийся вал эродировал берега, а селевая масса выплескивалась на стенки русла, и из нее вылетали отдельные камни. Движение потока сопровождалось сильным шумом».

Между прочим, речка Куро, имеющая и другое название — Бешеная Балка, знаменита тем, что о ней упоминал А. С. Пушкин в своем «Путешествии в Арзрум». Помните?

«Бешеная Балка также явилась мне во всем своем величии: овраг, наполнившийся дождевыми водами, превосходил в своей свирепости самый Терек, тут же грозно ревевший. Берега были растерзаны; огромные камни сдвинуты были с места и загромождали проток. Множество осетинцев разрабатывали дорогу. Я переправился благополучно».

8. Нигори (бассейн р. Оматикава, восточный склон хребта Хида, 15 км к северу от горы Яригатаке, остров Хонсю, Япония), 10 июля 1964 г. Грязекаменный поток возник при ясной погоде при интенсивном снеготаянии — 7 и 8 июля выпадали дожди. Максимальный расход около 430 $м^3/с$. Описание Такуро Ямадзаки, который наблюдал явление в районе устья р. Нигори:

«Прямо на глазах грязекаменный поток подобно черной змее захватывал отлогие речные берега, выкорчевывая высокие деревья, многие из которых увлекались потоком... В авангарде грязекаменного потока, подпрыгивая и залетая вперед, двигались стволы и обломки попавших в поток деревьев. В голове потока двигались несколько десятков глыб по несколько метров в диаметре и, кроме того, большое количество валунов поменьше... Ниже водопада капли грязи кружились в воздухе подобно пыли».

9. Южная часть долины Сан-Хоакин (Калифорния), 1905 г. Впечатления управляющего ранчо Сан-Эмигдио Дж. К. Дугласа в записи Г. Р. Джонсона из Лос-Анджелеса цитируются по статье Э. Блэкуайлдера:

«Когда он (поток) вышел из узкой щели бокового каньона, его сопровождало облако пыли, образовавшееся вследствие разрушения огромной массы сухой почвы о выступы при ее стремительном продвижении вниз по каньону. Сквозь пыль можно было заметить мелькание огромных движущихся валов с одиноким, непрерывно вращающимся деревом. Пройдя около полутора миль (2,4 км) ниже выхода малого каньона, эта волна полностью остановилась, только через несколько минут за ней последовала другая, более крупная и быстрая, чем первая. Она не поднимала пыль, так же как и последовавшие за ней волны, однако огромные глыбы, вес большинства которых достигал нескольких тонн, подпрыгивали над поверхностью, как пробки, поддерживаемые снизу земляной массой. Эта волна проследовала на полмили (0,8 км) дальше вниз по каньону, чем первая, и также остановилась, заняв всю ширину основного каньона, достигавшую в этом месте четверти мили (0,4 км). Через несколько минут пронеслась еще одна волна грязи, за которой последовали следующие через интервалы в несколько минут. Каждая последующая волна была жиже и имела большую скорость по сравнению с предыдущей...».

10. Долина Сухой Хапицы (бассейн р. Камчатки, район Ключевской группы вулканов), лето 1956 г. Грязекаменные потоки возникли во время ливней после извержения вулкана Безымянный. Описание Г. С. Горшкова и Г. Е. Богоявленской:

«Вода реки Сухой Хапицы переполнялась рыхлым материалом, образуя густую, но очень подвижную грязь, в которой, подобно деревьям, легко плыли крупные камни. Особенно удивительно было видеть, как в заводях, после водопадов, камни медленно плавали и кружились в струях противотечений. Масса твердого материала составляла 90—95 %...».

11. Акжар (бассейн Аксая, северный склон Заилийского Алатау), весна и начало лета 1969 г. Потоки вызваны ливнями. Расход до 10 $м^3/с$.

Описание В. И. Полянской:

«Первый селевой вал — это густая грязевая масса с камнями от четверти до одного метра в диаметре, настолько компактная и плотная, что движется как одно целое, словно утюг, медленно, но неотвратимо. За головой движение жижи ламинарное без струй и завихрений. В отдельные моменты кажется, что камни медленно плывут. С увеличением скорости по мере разжижения потока камни догоняют друг друга, соударяются, перекатываются. Движение становится все более турбулентным».

12. Акулисчай (Айлисчай, бассейн р. Аракс, юго-западный склон Зангезурского хребта). 21 мая 1884 г. Описание М. П. Псарева — доложено 9 апреля 1885 г. на заседании Кавказского отделения Русского технического общества:

«...В реке стала быстро наплывать сверху жидкая грязь и вслед за ней показались стремительные надвигающиеся массы густой грязи, смешанной с камнями и унесенными сверху деревьями. Массы эти следовали одна за другою с перерывами в несколько минут и, выступая из берегов оврага, разрушали или совершенно уничтожали встречавшиеся на своем пути постройки и сады; причем движение селя не представлялось непрерывным потоком, но происходило, то задерживаясь в своем течении, то вновь устремляясь по реке с громадной скоростью. Все это продолжалось не более одного часа, после чего уже грязь стала протекать в незначительном количестве по дну оврага...

В некоторых местах вследствие страшной быстроты движения селя были унесены довольно большие дома вместе с имуществом, в некоторых же сель, медленно двигаясь, остановился перед небольшими каменными заборами, не повредив даже последних... Сель иногда проходил по узким переулкам, почти под прямым углом к общему направлению его течения, увлекая при этом камни больших размеров».

13. Ордубадчай (непосредственный восточный сосед Акулисчая), 20 августа 1931 г. Описание Т. Г. Чикнаверова:

«...Заметили выходящую из-за поворота оврага и стремительно надвигающуюся волну бурого цвета громадной высоты. Отрываясь от волны летели камни, опережая ее. Массы грязи с камнями и унесенными деревьями скоплялись на поворотах оврага и, заполнив его, выхлестывали, разрушая на своем пути постройки и сады... На поворотах разница в уровнях следов прохождения селя достигала 5—6 м».

14. Гамзаличай (южный склон восточной части Главного Кавказского хребта, массив Базардюзи), ночь с 30 на 31 августа 1930 г. Описание А. Л. Брилинского:

«...Селевой поток, состоявший из густой грязи с камнями объемом до 1 м^3 (настоящая грязекаменная лава), пронесся по прямой линии из ущелья Гамзаличая через селение, не следуя по руслу реки, имеющей изгиб выше селения, сметая по пути деревья диаметром до 40 см и более. Ширина потока колебалась от 60 до 100 м ... Густота грязи и стремительность потока были таковы, что он, имея высоту до 6—7 м, не растекался в стороны, несмотря на имеющиеся уклоны, а следовал по прямой линии, составляющей продолжение ущелья... Отбитая от основного потока в сторону грязь вследствие своей густоты даже на склонах не растекалась, застывала на месте...».

15. Приток реки Хиспар (бассейн р. Хунза, Каракорум), 8 июля 1892 г. Описание У. М. Конвея:

«...Достигнув устья глубокого узкого бокового сухого русла, мы услышали шум, подобный грому, и увидели огромную черную волну, быстро несущуюся вниз... Когда мы достигли русла, основная масса материала прошла, и лишь продолжал быстро течь черный поток густой грязи. Он постепенно становился более жидким, пока вместо грязи не потекла черная вода... Мы... едва успели выскочить из вреза, когда другая громадная грязевая лавина стремительно пронеслась вниз. Это было ужасающее зрелище. Масса грязи увлекала груду обломков породы, переворачивая их, как гальку, которые подпруживали грязевой поток и замедляли его движение, увеличивая, однако, его мощность. Каждый из больших обломков породы, формировавших «голову» этой лавины, весил много тонн, наибольший достигал размеров 10-футового куба (3×3×3 м). Материал, который следовал за ними, наполнял русло до ширины около 40 и глубины 15 футов (12,2 и 4,6 м). Все это двигалось со скоростью около 7 миль в час (11,3 км/ч, или 3,1 м/с).

Когда фронт лавины прошел и глубина движущейся массы снизилась, смесь состояла наполовину из грязи, наполовину из обломков породы и двигалась быстрее. Вновь и вновь наиболее крупные камни преграждали дорогу, грязь накапливалась позади них, и вскоре сносила преграду... Трижды русло подвергалось ужасному воздействию этого явления, и каждый раз лавина находила

новый выход к основной реке и полностью изменяла конус выноса. Третья лавина была наибольшей, она удачно навалила массивную дамбу камней поперек русла почти у самых наших ног».

16. Бассейн Среднего Талгара (северный склон Заилийского Алатау), 15 июля 1974 г. Описание В. И. Шушарина и И. Н. Маркова:

«Наиболее крупные валуны, до 3 м в диаметре, двигались в передней части вала. Продвижение селевого вала сопровождалось нарастанием шума, переходящего в грохот, в котором преобладали низкие звуки. При прохождении селя по очагу, где уклоны достигали 22°, из потока вылетали камни, грязевая пыль, искры от ударов крупных валунов. Земля в непосредственной близости от русла вздрагивала».

17. Кенколсай (южный склон Кураминского хребта, Западный Тянь-Шань), 18 августа 1966 г. Описание И. Н. Степанова:

«После четырех часов сильного грозового ливня около 19 ч 20 мин в районе наблюдения прошла первая волна селя высотой 2—3 м со скоростью около 7 м/с...

Волна селя была как бы приподнята над ложем русла и на 90 % состояла из щебнистого материала с размерами частиц не более 10—20 см. Высота волны менялась в зависимости от ширины русла и местами достигала 8 м. Очевидно, тело потока обладало большой плотностью, так как выбрасываемая потоком на тропу селевая масса быстро застывала. О большой плотности свидетельствует тот факт, что камни весом 1—3 кг, брошенные в поток, плыли на поверхности некоторое время и лишь после этого погружались в селевую массу. В 19 ч 25 мин уровень потока упал, скорость уменьшилась до 4—5 м/с. Несмотря на это, даже на расстоянии 5 м от берега чувствовалось сотрясение почвы. В середине потока наблюдались всплески на высоту до 1 м. На поверхности потока были замечены деревья, кусты, куски дерна и крупные камни. Первая волна была черного цвета, последующие имели коричневый оттенок.

В 19 ч 52 мин прошла вторая волна с несколько меньшей, чем первая, скоростью 6—6,5 м/с, затем с промежутками 5,5; 6; 12 и 5 мин прошли еще 5 волн, при этом расход потока увеличился примерно до 200—220 $м^3/с$. Все семь волн селя — это грязекаменные потоки, прошедшие по различным саям правобережья р. Кенколсай».

Картины движения грязекаменных селей, нарисованные разными свидетелями, очень похожи друг на друга. Однако так как размеры, плотность и условия движения потоков были различны, не удивительны и разительные противоречия в изложениях очевидцев. Описания движения грязекаменных потоков можно систематизировать набором следующих фактов:

• движение селей — последовательное движение валов (1, 2, 3, 7, 9, 12, 15, 17);

• сель — река грязи, медленно текущая и выносящая валуны, кружащая их в «грязеворотах» (4, 10);
• плавание камней (4, 5, 10, 11, 17);
• хаотическое движение камней (1, 15);
• выбрасывание камней из потока (1, 6, 7, 13);
• брызги грязи и грязевая пыль над потоком (1, 2, 8, 16);
• в голове потока движется нагромождение особо крупных глыб, подталкиваемое более разжиженным материалом (2, 5, 6, 8, 11, 15, 16);
• валуны движутся медленнее, чем основное тело потока (3, 16);
• движение потока сопровождается очень сильным шумом и грохотом (2, 3, 4, 6, 7, 15, 16);
• движение потока почти бесшумно (5);
• большая разница в уровнях на поворотах (13);
• стремление к прямолинейности движения (14);
• стремление сохранить определенные ширину и глубину даже при движении по плоскости (14);
• на конусе выноса селевая масса расплывается (5).

Описания сухой (9) или каменной (3), а не грязевой пыли над потоком, видимо, относятся к предположениям, так как наблюдатели находились на большом расстоянии от места событий. Воздействие же грязекаменного потока на препятствие до того, как они соприкоснулись (6), возможно только иллюзия, связанная с наклоном плоскости фронта потока и положением наблюдателя.

Большинство свидетелей, как явствует из описаний, видели поток на конусах выноса или на дне широких долин. Нам пришлось неоднократно наблюдать за искусственно вызванными (но естественно сформированными в природном селевом очаге) крупными грязекаменными потоками в бассейне р. Чемолган. Диапазон максимальных расходов в экспериментах 1972, 1973, 1975 и 1976 гг. составлял 45—450 $м^3/с$.

Исключительную бурность грязекаменного потока, особенно на крутых участках, изобилующих изгибами и скальными выступами, создает крупнообломочный каркас потока, который, непрерывно и сильно деформируясь, почти мгновенно выжимает, выбрызгивает жидкую грязь вместе с мелкими камнями в воздух над потоком. Поверхность потока в таких местах представляет собой трехкомпонентный (мелкозем, вода, воздух), как бы кипящий слой, в котором время от времени на мгновение появляются лоснящиеся спины громадных валунов. Над потоком, особенно на грязепадах, клубятся облака грязевой пыли, везде господствуют пляшущие грязевые протуберанцы.

Иногда отдельные глыбы или целые их скопления, соизмеримые с шириной и глубиной потока, увлекаются им, скользят и влачатся, задевая за выступы руслового ложа. В узких скальных каньонах глыбы порой заклинивает, тогда поток переливается через

них стремительным грязекаменным каскадом. Ниже грязепадов, где скальное русло расширяется, селевая масса, перемешиваясь, вращается как бы в мощном грязевороте, прежде чем устремиться далее вниз. В местах расширения русла и снижения уклона течение, наоборот, приобретает более упорядоченный вид и спокойный характер. Именно в этих местах особо ощущается высокая плотность потока, его вещественная сущность и неудержимая мощь. Зачастую у одного берега можно видеть скользящую ровную ленту потока, в то время как у другого грязекаменная жижа находится в хаотическом состоянии.

Передняя часть грязекаменного потока в зависимости от характера русла и величины уклона может представлять собой то настоящую «голову» (нагромождение крупных валунов и глыб), медленно, иногда даже с остановками движущуюся вперед под давлением более разжиженной и обогащенной мелкоземом селевой массы, то черное чудовище, стремительно несущееся вперед, иногда даже как бы прыжками, с блуждающими щупальцами и призрачным фронтом, непрерывно меняющим очертания. Анестезирующий запах, грязевая пыль, дрожание земли, рев и гул, почти неслышные в общем грохоте всплески жидкой грязи, новые и новые катящиеся грязекаменные валы... Мощь селя, его неповторимое дыхание и мрачная красота навсегда оставляют человека эмоционально потрясенным.

Остановимся специально на повсеместно отмечаемой склонности грязекаменных потоков двигаться не непрерывно, а последовательными волнами. Распространенное объяснение этого факта связано с приписыванием селевым потокам заторного характера движения. Так, С. М. Флейшман (Сели. Л., 1978) пишет: «В результате образования заторов и последующих их прорывов селевой поток движется валами или волнами». При искусственном воспроизведении грязекаменных потоков на Чемолганском полигоне ни в одном месте далеко не прямолинейного скального русла заторы не образовывались. Несмотря на это, у потоков был четко выраженный валообразный характер движения.

Мы отнюдь не утверждаем, что заторы не могут случаться вообще. Но отрицаем заторный характер движения как свойственный самой динамической сущности грязекаменного потока. При медленном движении, если мощность потока недостаточна, голова селя зачастую останавливается или замедляет ход на любых участках русла до подхода «подкреплений». В местах же сужений или у других препятствий такая остановка, естественно, более вероятна. Однако валообразование скорее присуще не агонизирующим, а наоборот, крупным потокам, неудержимо рвущимся вперед и не страдающим от дефицита массы.

Появление валов могут вызвать:

• перерывы в поступлении воды в селевой очаг взаимодействия;

• последовательное поступление валов из разных очагов;
• обрушение масс мокрой породы с откосов вреза;
• тормозящее влияние группы особо крупных глыб и валунов, соизмеримых с шириной и глубиной потока.

Основная же причина возникновения последовательных валов — это, как уже указывалось, порождение цуга катящихся друг за другом волн, получивших в физике и математике название солитонов. Основной диагностический признак — приблизительно одинаковое расстояние между валами или же одинаковый интервал времени между их появлением.

6.6. Оползни, снежные лавины, снеговодные потоки

Оползни. Горный оползень — массив рыхлообломочной породы, сильно насыщенный водой, смещающийся вниз по склону. Образуется, когда сдвигающаяся сила β(+) превысит удерживающую β(–) или при сейсмических ударах. Ситуация в общем совпадает с описанной при развитии сдвигового селевого процесса. Отличия заключаются в поведении сдвинувшегося рыхлообломочного массива, зависящем от свойств последнего. Типичные оползни как участки склона хотя бы частично сохраняют свою целостность, иногда вплоть до растительного покрова. Движение может быть различным по типу (простое скольжение, скольжение с опрокидыванием) и скорости (от малой до очень большой). В неконсолидированных грунтах смещение дает начало движению так называемых оползней-потоков. Последние ничем не отличаются от селевых потоков высокой плотности, разве только дальностью распространения.

Оползни — обычно сфера интересов геологов, занимающихся экзогенными процессами, однако активная роль принадлежит здесь режиму увлажнения массивов горной породы. Поэтому гидрология потенциальных оползневых массивов наряду с традиционными геологическими аспектами должна играть важную роль, особенно в прогностическом плане.

Снежные лавины. Снежная лавина — оторвавшаяся масса снега, которая, нарастая, быстро (20—30 м/с) движется вниз по склону. Условия зарождения лавин подобны любым явлениям, связанным со сдвиговыми процессами, но имеют много особенностей, определяемых физическими свойствами и состоянием снега.

Метаморфизм снежного покрова и его деформация под действием собственной тяжести приводит к изменениям прочности снега, его проседанию и сползанию. Геометрические особенности формирования тела будущей лавины обычно связаны с особенно-

стями мезорельефа, но часто зависят и от многих случайностей, иногда на первый взгляд пустячных.

Снежные лавины обычно забывают причислять к гидрологическим явлениям, но по большому счету это неверно.

Снеговодные потоки. Наклонные узкие ложбины, где скапливаются особо большие снежные запасы, при внезапном и сильном потеплении заполняются густой кашей из воды и снега, удерживаемой целой системой снежно-ледяных плотинок и дамбочек. В условиях активного снеготаяния, переполнения «водо-снегохранилищ», теплового и механического разрушения перемычек происходит прорыв, и тогда снеговодный поток, имеющий многие признаки селевого, несется вниз на многие километры.

Снеговодные потоки, занимая промежуточное положение между наносоводными селями и мокрыми снежными лавинами, имеют свои особенности и собственные закономерности формирования, а также зоны распространения. Случаются они повсеместно, где развит приличный сезонный снежный покров, но в основном сведения о них приходят из горных районов Арктики, Субарктики и Антарктики.

Существует определенный диапазон уклонов (10—25°), способствующих оптимальному развитию снеговодных потоков. Классические районы их распространения — Хибины, Полярный Урал, Путорана, Бырранга, Шпицберген, Канадский Арктический архипелаг, Гренландия, Аляска.

6.7. Катастрофические обломочные лавины

Хаитская катастрофа

В 1949 г. в районе стыка Зеравшанского и Алайского хребтов разразилось мощное Хаитское землетрясение, вызвавшее грандиозные селевые потоки.

Первые два толчка силой 6 и 8 баллов случились утром 8 июля, а в 9 ч 58 мин 10 июля последовал главный 10-балльный удар. Землетрясение разрушило поселок Хаит и близлежащие кишлаки. Одновременно в различных местах бассейна р. Ярхич, правого притока Сурхоба (так называется среднее течение Вахша, который совместно с Пянджем дает начало крупнейшей водной артерии Средней Азии — Амударье), начались массовые обвалы и оползни.

Вот как описывает свои впечатления К. В. Станюкович, находившийся в это время в верховьях р. Ярхич с геоботанической экспедицией, лагерь которой был расположен на плоском выступе хребта над кишлаком Даштимухамеджон.

«...То, что мы увидели, было удивительно и страшно: весь склон над нами кипел, кишел каменными обвалами. Грохот был невозможный, какая-то смесь треска, лязга, визга, уханья. Щебень, камни и целые скалы, одни величиной со стол, другие с грузовик, вертясь и подпрыгивая, неслись вниз, на нас. Большая часть этих камнепадов сливалась по понижениям в каменные ручьи и реки. Сталкиваясь и прыгая друг через друга, они катились вниз».

Главные события развернулись в нижнем течении р. Яркич. Здесь на склонах горы Чокурак (2578 м) произошел обвал. Лавины коренной породы двигались с трех сторон, причем две — навстречу друг другу. Возникшая в результате их столкновения громадная водонасыщенная лавина суглинков и раздробленной скальной породы общим объемом 400 млн м^3 ринулась вниз по Дарихаузу — левому притоку р. Яркич. Промчавшись 5 км со скоростью около 30 м/с, она в сопровождении пылевого облака с ужасающим грохотом вырвалась из ущелья, в течение нескольких секунд завалила Хаит и, перегородив течение р. Яркич, уничтожила кишлак Хисарак, находившийся в 1,5 км от реки. На дне долины грязекаменная масса покрыла площадь 7 км^2, над погребенным Хаитом толща отложений кое-где достигла 80 м.

Перед грязекаменной лавиной шла воздушная волна, вырывая деревья с корнем и отбрасывая их на сотни метров.

В долине р. Ясман, которая впадает в Яркич справа недалеко от устья, в результате массовых оползней и обрушений покровных суглинков, особенно с правого борта долины, образовался грандиозный селевой поток. Настоящая грязевая река, местами шириной до 2 км, потекла по долине, затопила ее нижнюю часть, погубив несколько кишлаков, уничтожив сады, и, в конечном счете, оставила около 145 млн м^3 отложений.

Другой грязевой поток объемом 30 млн м^3 зародился на правом склоне долины Яркича напротив селения Яркичкала, пересек реку и завалил селение слоем грязи 5—7 м.

В районе кишлака Яркичмиона поток с правого борта долины поднялся на противоположный, имеющий уклон 5—6°, на расстояние 600 м. Хаитская катастрофа унесла 20 тыс. жизней.

Селевые потоки на ледниках

27 марта 1964 г. во время знаменитого аляскинского землетрясения (эпицентр находился в 120—130 км к востоку от города Анкориджа) во многих местах обрушились лед и горная порода. Эти скально-оползневые лавины при движении преобразовались в мощные грязекаменные потоки, покрывшие отложениями многие ледники. Лавины на первых сотнях метров набирали большую скорость, и селевые потоки проходили несколько километров по

поверхности ледников, несмотря на очень малый уклон, часто менее 5°.

Один из крупнейших потоков сошел с хребта Вакселя на поверхность ледника Стеллера. Его застывшее тело длиной 6,5 км и шириной до 2 км имело объем около 10 млн м^3. Место отрыва первоначальной лавины расположено на высоте 3 000 м. Если лавина первые 600 м проходила по 43-градусному склону, то селевой поток последние 3 км двигался при уклоне менее 2°. На соседнем леднике Мартин-Ривер отложилось 24 млн м^3 селевой массы.

Со скального массива Шэттед-Пик (Чугачские горы) лавинные сели сошли в трех различных направлениях. Один спустился на ледник Сэдльбэг, а два — на ледник Шерман. Объем крупнейшего потока на последнем оценивается в 25 млн м^3. На леднике Сиукс отложилось 8,4 млн м^3 грязекаменной массы.

В системе береговых аляскинских хребтов Чугач, Вакселя и Кенайского полуострова 26 ледников были отмечены лавинными селями, а общее число селей превысило 50. Селевые потоки, вызванные землетрясением 27 марта, не представляются из ряда вон выходящими. Такие явления имели место в этом районе и до 1964 г., и позже.

В горах Святого Ильи, в юго-восточной части, на территории и в окрестностях национального парка Глейшер-Бей, прошли селевые потоки на следующих ледниках: Кэйзмент (1945 г.), Джона Гопкинса (1961 г.), Мэржери (1961 г.), Нетленд (1952 г.), а в Чугачских горах — на ледниках Смит (1955 г.), Брин Мэр (1960 г.), Вэсэр (1958 г.), Бэрри (1960 г.), Серпентин (1963 г.), Сюрпризный (1963 г.), Пигот (1945 г.). Площадь селевых отложений была от 0,5 до 4 км^2, а длина потоков от 1,5 до 3,5 км.

После марта 1964 г. лавинные сели прошли по поверхности ледников Эллин (1965 г., длина 7,5 км) в Чугачских горах, Хорошей погоды (1965 г., 10,5 км) в горах Святого Ильи, Блоссом (1965 г., 1,5 км) и Мэвин (1965 г., 3,0 км) в районе горы Святого Ильи (5 488 м). Естественно, что землетрясение могло повысить вероятность формирования лавинных селевых потоков, так сказать, заложить мины замедленного действия.

Уаскаран

Уаскаран (6 768 м) является высочайшей вершиной Кордильеры — Бланка — горной цепи в Перуанской Западной Кордильере, несущей наиболее значительное в этом районе оледенение.

В 18 ч 13 мин 10 января 1962 г. часть ледника северной вершины Уаскарана длиной почти до 1 км и толщиной более 30 м общим объемом 2—3 млн м^3 без каких-либо сейсмических воздействий с почти километровой высоты обрушилась на нижний ледник, захватив по пути множество обломков горной породы. В результате

часть нижнего ледника площадью около 0,2 км^2 была разрушена и приняла участие в дальнейшем движении этой скально-ледяной лавины. Общий объем последней исчислялся в 10 млн м^3. Ниже ледникового языка лавина мчалась на протяжении 3 км по 20-градусному склону со скоростью 30—50 м/с. Она представляла собой вал высотой 60—90 м и длиной до 1,5 км. По ее сторонам дул ураганный ветер. В районе крутого поворота долины налево, у древних морен ледника, где сейчас находятся озера Ллангануко, грязекаменный поток, мчавшийся со скоростью 25—30 м/с, имел поперечный уклон 20° и оставил отложения на террасе, лежащей на 150 м выше дна долины. Размер одной из наиболее крупных глыб, вынесенных сюда потоком, составил 12×8×6 м. На последующем повороте долины вправо часть селевой массы отложилась на левом берегу на высоте около 50 м. До этого места поток оставил V-образный врез.

Далее волна потока объемом уже около 13 млн м^3 прошла через конус выноса с постепенно расширяющимся фронтом и уменьшающимися высотой и скоростью. В начале конуса передний вал высотой 15—18 м мчался со скоростью 10—15 м/с. По краям фронта высота вала составляла лишь 1,5—2 м. Однако в центре потока сила его воздействия была достаточной, чтобы нести глыбы размером 20×15×12 м; длинные оси их оказались ориентированными параллельно биссектрисе конуса выноса. Когда грязекаменный поток достиг Рио-Санты, ширина его фронта составляла около 1,5 км. Селевая масса была выброшена на противоположный берег реки на высоту 30 м. По ней в результате прорыва воздвигнутой селевым потоком плотины прошла прорывная волна 12-метровой высоты.

Уаскаранский сель разрушил шесть селений полностью, в том числе крупный поселок Ранраирку, и три частично. Погибло 4 тыс. человек. Специалисты считали, что повторяемость такого потока около одного раза в столетие, а некоторые даже — в тысячелетие и реже. Тем не менее, через 8 лет разразилась новая катастрофа.

31 мая 1970 г. в 15 ч 23 мин сильное землетрясение с эпицентром в 25 км к западу от перуанского портового города Чимботе за 45 с превратило в развалины города и деревни на площади около 65 тыс. км^2, в том числе города Уарас и Юнгай в долине Рио-Санта. В результате мощных сейсмических толчков с северной вершины Уаскарана от ледника Хелмес откололся громадный блок льда и горной породы. Общее количество вещества, принявшего участие в селевом процессе, слагалось из 7 млн м^3 скальной породы, 1 млн м^3 льда с вершины, 5 млн м^3 фирна с нижнего ледника, 30 млн м^3 моренных и прочих отложений, захваченных на трехкилометровом участке между высотами 4 500 и 2 800 м и составило от 50 до 100 млн м^3.

Рухнувшая масса льда и породы ринулась в долину по двум направлениям: на запад и на север.

Западный обвал объемом примерно 5 млн м^3 создал перемычку между верхним и нижним озерами Лланганукo.

Масса основного, северного, обвала, собственно и вызвавшего катастрофу, рухнула на нижний ледник и, нарастая, устремилась через морены, пастбища и поля вниз по долине р. Лланганукo. На первых 610 м потери высоты масса совершила почти свободное падение, следующие 2740 м — путь по уклону 23° и последние 670 м — по уклону 5°. Скорость движения фронта потока была исключительно велика, ее среднее значение на 14-километровом участке от подошвы Уаскарана (5700 м) до города Юнгай (2570 м) оценено приблизительно в 110 м/с (средний уклон 0,225). Валуны массой более 3 т выбрасывались из потока далее чем на 800 м.

Через какие-то 5 мин после начала землетрясения развалины города Юнгай были погребены под относительно небольшим языком грязекаменной массы (2,3 млн м^3). Мощность отложений здесь составила от 1,5 до 30 м над уровнем городских построек. Поток, мчавшийся по долине Лланганукo, буквально перепрыгнул водораздел, имеющий здесь высоту 100—200 м, и обрушился на город, в то время как его предшественник 1962 г., шедший здесь с меньшей скоростью, не смог этого сделать. В долине Лланганукo был вновь почти полностью уничтожен поселок Ранраирка, заново отстроенный после катастрофы 1962 г. значительно южнее прежнего места (рис. 6.7).

Большой интерес представляет описание этого уаскаранского селя геофизиком Матео Касаверде из Перуанского геофизического института, который случайно оказался там.

«...Землетрясение начало затихать. В это время я услышал сильный рев и грохот со стороны Уаскарана. Взглянув туда, я увидел

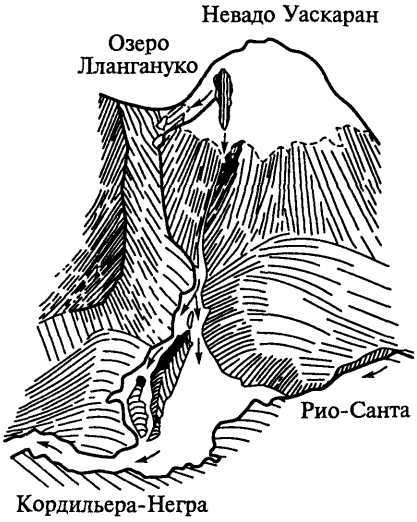


Рис. 6.7. Схематический рисунок склона горы Невадо — Уаскаран (южная вершина 6768 м, северная 6663 м) и долин Лланганукo и Рио-Санта, где 31 мая 1970 г. образовалась катастрофическая ледово-каменная лавина и селевой поток.

Черным кружком отмечено местоположение города Юнгай (Перу)

что-то в виде тучи пыли; казалось, будто большая масса камня и льда откалывается от северного пика. Мне сразу же захотелось забраться повыше, и я побежал к вершине кладбищенского холма, который был в 150—200 м от нас. Я заметил, что многие в Юнгае тоже бегут к этому холму... Гребень приближающегося вала кончался чем-то вроде клуба пены, как у громадных океанских волн. По-моему, высота вала была не меньше 80 м. Было видно, что сотни людей в Юнгае бегут в разные стороны и многие из них к кладбищенскому холму. Все это время не прекращался страшный рев и грохот. Я добежал до верхней площадки холма в тот момент, когда поток каменных обломков ударился об основание этого холма... Это было самое ужасное, что я когда-либо пережил, и я никогда этого не забуду».

В долине Рио-Санта поток выбросил селевую массу на противоположный берег на 83 м и после поворота на 90° имел достаточно сил для опустошения долины по обоим берегам реки. Поток жидкой грязи с включением мелких гранодиоритовых валунов и гальки, прошедший вниз по руслу Рио-Санты, преодолел 50 км за 2 ч (скорость 7 м/с). Погибло 27 тыс. чел.

Знаменитые уаскаранские обвально-селевые гиганты имели предшественника. Среди специалистов он значится под названием «Доколумбова». По мощности он видимо намного превышал поток 1970 г. По крайней мере кое-где он поднялся выше последнего на 260 м. Вот некоторые приближенные цифры: объем наносов 100—200 млн $м^3$, площадь отложений более 30 $км^2$, средняя скорость движения 90—100 м/с, высота и скорость волны при подходе к р. Рио-Санта 45 м и 40 м/с, соответственно подъем потока на противоположный борт долины р. Рио-Санта на 123 м.

Геналдонские катастрофы

При катастрофических подвижках и обвалах ледников иногда наблюдается отрыв части ледниковой массы, сопровождающийся дроблением льда, выбросом внутриледниковых вод, захватом рыхлообломочных отложений. При этом образуются своеобразные потоки смеси воды, льда и обломков горной породы, скорости которых очень велики как вследствие большой подвижности названной смеси, так и в результате получения импульса от первичного обвала.

В этом плане широко известна так называемая Санибанская (Геналдонская) катастрофа в бассейне р.Геналдон на северном склоне Казбекско-Джимарайхохского массива Большого Кавказа. В районе ледника Колка 3 и 6 июля 1902 г. случились два гигантских выброса ледяной массы. При этом был разрушен курорт Кармадон, расположенный близ конца ледника Майли, с которым ледник Колка сливался еще в конце прошлого столетия. Более

70 млн м^3 льда и горной породы отложились по дну долины р. Геналдон на протяжении 8 км. Лед сохранялся здесь в течение 12 лет.

20 сентября 2002 г. в бассейне р. Геналдон с перемычки между горными вершинами Джимарай-Хох (4780 м) и Майли-Хох (4598 м) с 800-метровой высоты на поверхность ледника Колка рухнула лавина обломков льда и горной породы объемом не менее 60 млн м^3. В результате удара из тела ледника было «выбито» дополнительно 70 млн м^3, после чего лавина устремилась вниз по долине Геналдона, по которой и прошла 19,5 км со скоростью около 80 м/с. Удар лавины принял на себя правый борт долины, ниже древних развалин селения Генал, где отложилась основная масса ледокаменного потока объемом 110—115 млн м^3. В этом месте расположены так называемые Кармадонские ворота — вход в узкое (17—30 м по дну) извилистое ущелье, прорывающееся через Скалистый хребет. Через это ущелье часть ледово-каменной массы проследовала дальше, постепенно превратившись в типичный грязекаменный (с присутствием большого количества льда) селевой поток. Приведенные цифры соответствуют данным геолога И.М.Васькова, который сформулировал серию вопросов, ответы на которые могли бы прояснить природу описываемого катастрофического явления. Наиболее интересны из них следующие:

- каков был начальный импульс, достаточен ли он для объяснения величины наблюдаемых объемов и скоростей?
- как распределилась энергия удара?
- принимать ли во внимание теорию пульсации ледников?
- каковы оптимальные соотношения горной породы и льда для поддержания высоких скоростей?
- каков был характер движения массы в зоне транзита?
- возможно ли было создание «воздушной подушки»?

Наши расчеты с помощью уравнения (6.6), дополненного членом, учитывающим первоначальное, почти свободное падение массы на ледник, позволили оценить возможные скорости движения ледово-каменной лавины в зоне транзита (уклон 7,1°; глубина потока 60 м):

- около 100—120 м/с, с учетом свободного падения с высоты 500 м;
- около 25 м/с, без учета последнего.

Определяющую роль в получении таких результатов сыграло наличие льда (около 40—50 %) в общей обломочной массе, который имеет все три параметра указанного уравнения (динамический угол внутреннего трения, аналог коэффициента динамической вязкости и коэффициент перемешивания) многократно более низкие по сравнению с таковыми для скальных глыб и обломков.

Таким образом, нет необходимости сомневаться в достижении столь высоких скоростей движения ледово-каменных лавин. Можно также полагать, что пульсационные свойства ледника Колка к данной катастрофе отношения не имеют. Следует исключить и бездоказательные рассуждения о возможной роли «воздушной подушки» в обеспечении высоких скоростей подобных лавин. Интересно, что эта «красивая» идея время от времени реанимируется в связи с какими-нибудь очередными катастрофами. Это, например, имело место в связи с фактами быстрого движения грязекаменных потоков по поверхности ледников в горах Чугач, Вакселя и Святого Ильи во время аляскинского землетрясения 27 марта 1964 г. И вот пригодилось теперь для геналдонской лавины. Воздушная волна часто сопровождает подобные лавины и даже вырывает с корнем деревья и кустарники вдоль их границ (как это было при вышеописанной Хаитской катастрофе), но не более того. Воздух — слишком подвижная среда, чтобы попасться в лавинную ловушку при столь чудовищном давлении.

Дидаль

Аналогию с Санибанской катастрофой находят свидетели подвижки и обвала ледника Дидаль (4,8 км), расположенного в верховьях одноименной реки на северном склоне хребта Петра Первого в бассейне р. Сурхоб (Таджикистан). 21 июля 1974 г. по долине р. Дидаль промчался прорывной паводок, разрушивший автодорожный мост, а 13 августа произошел обрыв 600-метровой части глетчерного языка, и ледяная масса объемом около 2 млн $м^3$ обрушилась с высоты 3 000 до отметки 2 200 м. Движение ледяного «селя» описано А. А. Яблоковым: «...По ущелью со скоростью курьерского поезда проносились серо-зеленые валы битого льда высотой с семиэтажный дом. Обрушение льда сопровождалось громовыми раскатами, а движение его — низким шелестящим гулом. Ледяные валы взметались ввысь, опрокидывались, лизали скалы, а с задернованных склонов срывали почву. Скорость ледяного потока достигала 20 м/с».

6.8. Гидрологические катастрофы на планете

Наводнения

Дать хотя бы краткий обзор особо выдающихся наводнений почти невозможно, ибо нет объективных критериев, объединяющих в себе площадь и глубину затопления, нанесенный ущерб и число погибших, вероятность повторения подобного события или превосходящего его. И все-таки особый интерес вызывают сведе-

ния о том, где подобные явления происходят чаще, или же они достигли особой силы и мощи.

Если взять обе российские столицы, то петербургские наводнения широко известны и почти разрекламированы, а вот в Москве мало кто помнит (или читал об этом), что в 1924 г. по Тверской улице неслась настоящая река.

В 1844 г. опустошительные наводнения случились в Прибалтике, Тверской и Оренбургской губерниях, а также на Западной Двине и р. Великой, на которой стоит город Псков.

1908 г. был отмечен большим наводнением на Верхней Волге, в том числе на Оке и Москва-реке.

В июле 1897 г. большое наводнение на реках Ингоде и Шилке (бассейн Амура) привело к затоплению строящейся тогда Транссибирской железнодорожной магистрали, в результате чего было принято решение поднять ее на 6,4 м.

Большие наводнения на Нижнем Енисее всегда были связаны с совпадением волн половодья всех «трех Тунгусок» (Ангары, Подкаменной и Нижней Тунгусок). В 1937 г. город Енисейск был затоплен на глубину до 2,5 м. В 1959 г. наводнение совпало с расходом воды у Игарки, равным 159 тыс. $м^3/с$.

В 1979 г. на р. Вятке случилось особо сильное наводнение, которое превзошло все другие, случившиеся за последние 100 лет.

В исторических документах сохранилась запись о неслыханных наводнениях на территории нынешней Германии в 987 г. (за год до крещения Руси).

В 1813 г. было особо крупное наводнение на р. Висла (Польша).

В 1910 г. имело место необычайное наводнение на р. Сена в Париже.

В Италии на р. Арно наводнения случаются довольно регулярно. Особо печально известно наводнение 3—4 ноября 1966 г., уничтожившее бесценные художественные сокровища во Флоренции.

Во время великого наводнения на р. Чанцзян (Янцзы) в 1931 г. пострадало 60 млн чел.

«Горе Китая», р. Хуанхэ, известна своими опустошительными наводнениями, сопровождающимися в ее низовьях блужданием русла и изменениями местоположения устья. За 4 000 лет летописных сведений река более полутора тысяч раз прорывала дамбы, пытающиеся удержать реку в положенном русле, и широко разливалась на просторах Великой китайской равнины, и более 20 раз меняла свое русло, впадая то в Желтое, то в Восточно-Китайское моря.

Индийская «Река печали», приток Ганга Коси, ведет себя подобным же образом, правда в меньших масштабах и приносит средний ежегодный ущерб в 100 млн рупий.

К Ассамской долине (Индия), где протекает р. Брахмапутра, примыкает плоская низменная равнина в пределах общей дельты Ганга, Брахмапутры и Мегхны (Бангладеш). На этой территории

часто десятки тысяч квадратных километров скрываются под водой. Особо сильные наводнения здесь иногда принимают форму настоящего национального бедствия.

Регулярные разливы Нила делают его долину настоящей житницей, но в отдельные годы здесь случаются отдельные наводнения, приносящие колоссальные бедствия. В 1874 г. вода в Ниле у Каира поднялась против обычного на 9 м.

В 1974 г. произошло Великое Австралийское наводнение. В середине января со стороны Тиморского моря муссон обрушил на всю северную часть Австралии мощные ливни. В Западной Австралии в течение 17 ч выпало 480 мм осадков (средняя интенсивность 0,47 мм/мин). Города Дарвин (66 тыс. жит.) и Брум были частично затоплены и эвакуированы. В северо-западном Квинсленде вода поднялась выше телеграфных столбов. В конце месяца бедствие продолжало разрастаться. Вышла из берегов р. Брисбен, текущая через столицу штата Квинсленд г. Брисбен (800 тыс. чел.). Всю первую половину февраля продолжали обрушиваться ливни. Принесенный ущерб был огромным. При всей своей катастрофичности наводнение 1974 г. уступает таковому в 1893 г., когда в течение трех недель 10 тыс. жителей Брисбена (из 90 тыс.) лишились крова.

Борьба с наводнениями на Миссисипи имеет свою длинную и поучительную историю. С 1927 г. эта борьба перешла из рук местных властей в компетенцию федерального правительства США. Самое сильное наводнение (максимальный расход 57 тыс. $м^3/с$) случилось в 1973 г.

Величайшее стихийное бедствие на территории США произошло 18—25 июня 1972 г. во время урагана «Агнесса». Наводнения распространились от Джорджии до штата Нью-Йорк. Вашингтон был затоплен на треть метра. Материальный ущерб от урагана и последовавшего за ним наводнения превысил 3 млрд долл., погибли 118 человек.

Почти в то же время, 9—10 июня 1972 г., на северо-восточных склонах гор Блэк-Хилс (высшая точка 2207 м) в штате Южная Дакота выпали сильнейшие осадки (400 мм менее чем за 6 ч, при средней интенсивности более 1,1 мм/мин). Наводнение погубило 237 человек и нанесло ущерб, оцениваемый в 120 млн долл. Особо пострадал г. Рапид-Сити на одноименной р. Рапид-Крик. Почти годовая норма осадков выпала практически за один день. Вероятность такого события была оценена в 0,02—0,05 %, т. е. предполагалось, что оно может произойти не чаще, чем 1 раз в несколько тысяч лет.

Селевые потоки и родственные явления

Посмотрите на горы мира: они покрыты язвами селевых очагов, исполосованы шрамами селевых русел. Горные долины и окрестные равнины — это грандиозная свалка селевых выносов.

География селей — география гор. Формула «где горы — там и селевые потоки» несомненно, правильна. Но разнообразие горных ландшафтов безмерно. Столь же безмерна и пестрота селепроявления на лике Земли. Однако характер общих закономерностей их распределения в зависимости от главных определяющих факторов очевиден.

Рельеф — это тот плацдарм, где развертываются селевые процессы. Обычно чем выше горы, тем большего от них может ожидать гидролог. Но высота сама по себе еще ни о чем не говорит. Северный Тибет, Восточный Памир, Альтиплано в Боливии — плоскогорья, поднятые на высоту 4—5 тыс. м, не отмечены выдающейся селевой деятельностью. Важны контрасты, молодость рельефа, взлет склонов и вершин над узкими и глубокими долинами. И если говорить о карте рельефа, наилучшим образом информирующей о селеопасности территории, то это будет карта уклонов, но не гипсометрическая. При прочих равных условиях хребты окраин горных сооружений, первыми принимающие на себя удар влагоносных воздушных масс, более селеактивны.

Горная порода — это материал, из которого природа лепит сели. Скальные и рыхлые породы слагают поверхность Земли. Очевидно, что их свойства уже сказались в облике рельефа. Рыхлые породы в той или иной мере подготовлены к селеформированию. Что же касается скальных пород, то нас в первую очередь должна интересовать податливость их выветриванию, т. е. способность превращаться в свою рыхлую разновидность.

Вода — это ливни, прорвавшиеся озера и внутриледниковые водоемы. Часто именно отсутствие воды лимитирует селепроявления.

Многочисленные скальные селевые очаги на южном склоне Рушанского хребта, легко обозреваемые с Памирского тракта, вследствие слабых ливневых возможностей района десятки и сотни лет ждут своего часа. Конечно, рано или поздно долготерпение их будет вознаграждено, но станем ли мы этому свидетелями?

На земном шаре много сухих мест, где дожди выпадают крайне редко. Это, например, Сахара, пустыня контрастов и парадоксов, отмеченная редкими дождями и в то же время удивительной их силой. Ливневые воды на короткое время переполняют сухие русла, имеющие здесь специфическое наименование «вади», и одна из главных опасностей, подстерегающих вас в Сахаре, — это опасность утонуть.

Перенесемся на 10 тыс. км к тихоокеанскому берегу Южной Америки. Здесь, у подножия Анд, лежит одна из самых сухих местностей нашей планеты. Тысячи селевых бассейнов томятся в бесплодном ожидании. Но дожди случаются и здесь. Обыденность нарушается резким усилением теплого океанического противотечения Эль-Ниньо. Последствия этого бывают ужасными. Внезапно

возникшие нагромождения облаков изливаются на склоны гор грандиозными ливнями, грязекаменные и наносоводные потоки устремляются через прибрежную равнину в океан, разрушая по пути дороги, мосты, оросительные системы и занося поля селевыми отложениями. Есть сведения, что подобные явления случались и во времена инков, а дальше в 1546, 1878, 1884, 1891, 1918, 1925, 1932, 1939, 1941, 1953, 1957—1958, 1965, 1972, 1976—1977, 1982—1983, 1986 гг. В перуанском портовом городе Трухильо с 1918 до 1925 г. выпало всего 36 мм осадков, а за 7—9 марта 1925 г. — 226 мм.

Величайшая выпуклость Земли Тибет почти неселеопасна и лишь в центральной части отмечена ареалами гляциальных селепроявлений в таких массивах, как Алинг-Гангри, Кайлас, Улугмузтаг, Тангла, Ньенчен-Тангла. Но внешние уступы этого гигантского пьедестала являются районами, в высшей мере подверженными селевой деятельности, районами торжества самых разнузданных и бесчинствующих селепроявлений.

Большие Гималаи, тщетно пытающиеся отгородиться от муссона грядой Сивалика, отбиваются тысячами грязекаменных потоков и бурными наносоводными чо (пенджабское название селя).

Гиндукуш, засыпающий себя осыпями, истерзанный потоками всех классов и типов, также оспаривает пальму селевого первенства.

Западный Куньлунь через лабиринт узких ущелий выбрасывает многочисленные селевые потоки на Таримскую равнину. Северо-восточная засушливая окраина — горные системы Восточного Куньлуня, Алтынтанга и Наньшаня — также служит ареной действия великого множества наносоводных и грязекаменных селей, нагромождающих у подножия хребтов обломочный материал.

А юго-восточная периферия Тибета, горная страна Кам, поражающая зрителей особой грандиозностью ландшафта? Здесь, среди глубоких ущелий, узких скалистых гребней, врезов и рытвин, селевая деятельность достигает невиданного напряжения.

А сверкающий ледниками Каракорум, откуда как бы «начинаются» все горы Азии! Каракорум известен особым размахом гляциально-селевых явлений: озера здесь непрерывно подпруживаются, причем такие, как знаменитое Гапшан на Шайоке, внутриглетчерные водоемы опорожняются, моренные озера прорываются, грязекаменные лавины, или сва, как их здесь называют, обрушиваются почти из каждой ложбины.

Памир, Алай, Тянь-Шань, где сели случаются повсеместно и часто, имеют уголки, пользующиеся особой известностью. Это Заилийский Алатау, атакующий Алма-Ату грязекаменными потоками, Киргизский хребет, Ферганская долина со своими селеопасными адырами и горным окружением, Гиссарский хребет с грязекаменными селепроявлениями Кафирнигана, Варзоба, Тупо-

ланга и наносоводными потоками на юго-западных окраинах. Здесь хорошо известны сели Дарваза, горного обрамления озера Иссык-Куль, бассейнов Зеравшана, Сурхоба, Обихингоу, озерно-прорывные шалости ледников Медвежьего на Ванче и Инылчека в районе Хантенгри.

На Алтае и в Саянах тоже грохочут селевые потоки, особо ожесточены они на юге, где наносоводные уиры Монгольского и Гобийского Алтая приобретают невиданный размах.

С продвижением к северо-востоку грязекаменные потоки и камни в селевой массе мельчают, но это частично компенсируется числом и интенсивностью селепроявлений, мощностью наносоводных селей, чему в немалой степени способствует многолетняя мерзлота. Колоссальная полоса гор, тянущаяся от Байкала на восток, а затем на северо-восток вдоль охотского побережья и далее, от горного узла Сунтар-Хаята раскидывающаяся во все стороны, заполненная такими селеносными хребтами, как Баргузинский, Кодар, Удокан, Становой, Джунгджур, Верхоянский, Черского, Колымский, Корякский, продолжается по ту сторону Берингова пролива, включая не менее богатые селевыми явлениями хребты Аляскинский, Брукса, Маккензи.

Скалистые и Каскадные горы, Сьерра-Невада, Большой Бассейн — громадная территория, на которой селевые процессы происходят повсеместно. Особо известны лахары Лассен-Пика и Сен-Хеленс; гляциальные сели массивов Бейкер, Глейшер-Пик, Рейнир, Адамс, Худ; подпруженные ледниками прорывающиеся озера Кенайского полуострова, гор Чугач, Святого Ильи, Врангеля, Берегового хребта, среди которых такие феномены, как озера Джордж и Тальсеква; знаменитые селевые потоки гор Сан-Габриель, посягающие на Лос-Анджелес; наносоводные, грязевые и грязекаменные потоки Сьерры-Невады и возвышенностей и хребтов Большого Бассейна: Уайт-Маунтинс, Стиллуотер, Стинс, Руби; потоки гор Уосатч, атакующие среди прочих объектов цивилизации город Солт-Лейк-Сити. Даже считавшийся неселевым хребет Титон в Средних Скалистых горах в 1941 г. сделал свой единовременный вклад не менее чем сотней грязекаменных потоков.

Анды Центральной и Южной Америки — выдающаяся селевая территория земного шара. На вулканах Гватемалы, Коста-Рики, Эквадора и Чили бушуют лахары, знаменитая Кордильера-Бланка известна страшными уаскаранскими катастрофами и другими селевыми сюрпризами, подпруженные ледниками озера прорываются на пространстве от экватора до Патагонии, ливневые грязекаменные уайкос (окончание «с» говорит о множественном числе) грохочут во всех трех Кордильерах — Западных, Центральных и Восточных.

Альпы настолько освоены человеком, что там даже малые сели переносятся очень болезненно, а катастрофические сразу попада-

ют в разряд национальных бедствий. Селевые явления здесь разнообразны, активны и повсеместны. Можно утверждать, что над Французскими, Швейцарскими, Итальянскими, Австрийскими Альпами непрестанно слышится грохот грязекаменных потоков.

Большой Кавказ — район бурного протекания селевых процессов. Черные грязекаменные потоки в его юго-восточной части — выдающиеся во многих отношениях. В Приэльбрусье, Сванетии, Дагестане, Казбекском районе селевые потоки время от времени будят эхо почти во всех ущельях.

Огрызаются селями и приполярные горы Антарктиды, острова Евразиатской Арктики, Канадского Арктического архипелага, Гренландии, не говоря уже об Исландии, которую йокульлаупы (прорывные ледниковые паводки) и гляциально-вулканические процессы превратили в остров величайшей селевой напряженности.

Залесенность хребтов, даже полная, часто не может служить гарантией отсутствия селевых явлений, и это подтверждают примеры Карпат, Средне-Сибирского плоскогорья, Хамар-Дабана, Сихотэ-Алиня, Белых гор в Нью-Гемпшире, Аппалачей, плато Кваха в Гане, Гонконга, района Рио-де-Жанейро.

Селевые потоки настолько вошли в жизнь населения Малайского архипелага и Японских островов, что Индонезию можно назвать страной лахаров и банджиров, а Японию — ямацунами и тоисирю.

Не избавлены от селей и острова в океане: в 1861 г. селевая катастрофа разразилась на Сейшельских, а в 1886 г. грязекаменный поток прошел через Порт-Стенли на Фолклендских островах.

В этом беглом обзоре мы не упомянули о Пиренеях, Апеннинах и Балканах, об Эфиопском нагорье и Драконовых горах, о мексиканских Сьерра-Мадре и Гвианском нагорье, о горах Австралии, Новой Гвинеи, Новой Зеландии, Мадагаскара и Шри-Ланки, о хребтах в пределах Турции, Ирана и полуостровов Аравийского, Корейского, Индокитая и о многих других объектах. Так вот, все они тоже селеопасны, и их потоки местным жителям представляются самыми ужасными на свете.

Горы — горами, но во многих лишь слегка всхолмленных местах также случаются сели, например, в Киеве или в оврагах и балках Среднерусской возвышенности... Мы останавливаемся, иначе мы с вами придем к выводу, что сели вообще повсеместны и вездесущи.

6.9. Своими руками

Многое можно натворить в горах! И селевые потоки наказывают нас за безалаберность, некомпетентность, равнодушие. Приведем примеры.

Печально известна катастрофа в Аберфане — поселке на р.Тафф в Южном Уэльсе (Англия), ставшим сейчас южным пригородом

города Мертир-Тидвил. Здесь, в районе угольной шахты Мертир-Вейл, с 1875 г. отсыпались огромные отвалы пустой породы (глинистые сланцы с включением шлака и «хвостов» — очень тонкозернистых отходов обогатительной фабрики), организованные в семь терриконов. Вершина одного из них находилась на высоте 156 м над поселком и на расстоянии 600 м от ближайшего дома. Решающим оказалось сильное увлажнение отвалов (выход грунтовых вод плюс осадки).

Туманным утром 21 октября 1966 г. подвижка водонасыщенного материала привела к возникновению селевого потока объемом 107 тыс. м^3. Грязекаменная масса со скоростью 9 м/с ворвалась в поселок, уничтожив ряд жилых домов и школу. В результате погибли 116 детей и 28 взрослых. Для расследования причин катастрофы, получившей поистине международный резонанс, английское правительство назначило специальный трибунал.

В феврале 1972 г. близ города Саундерс в Западной Виргинии (США) после сильных дождей прорвалась плотина Буффало-Крик. Возникший техногенный сель, состоящий из отработанных вод и отвалов угольных шахт, прошел путь в 24 км, разрушив около 4 000 домов и погубив 125 человек.

Сточные воды г. Алма-Ата сбрасываются в северо-западном направлении, где скапливаются в естественных блюдцеобразных понижениях Сорбулак и Жаманкум. Последний накопитель являлся резервным. Поскольку в 1987 г. Сорбулак уже содержал около 1 млрд м^3 зловонной жижи, то все направлялось в Жаманкум. Только за последние пять месяцев 1987 г. туда было добавлено более 25 млн м^3 воды.

Песчаная плотина в условиях подтопления — временное препятствие. И вот около 9 ч утра 29 января 1988 г. водонасыщенный песок двинулся. Сточные воды прорезали пески Моинкумов и 70 млн м^3 песка и воды обрушились в р. Каскелен. Поток жуткой смеси расходом до 4—5 тыс. м^3/с и шириной местами до 1 км погубил 10 человек, снес два автодорожных и один железнодорожный мост (поезд Новосибирск—Ташкент чудом успел затормозить перед провалом), загрязнил Капчагайское водохранилище. Последствия — моральные, экологические, экономические.

В 10 км к западу от Душанбе, в полосе предгорий, окаймляющей с севера Гиссарскую долину, расположена покатая возвышенность — адыр Уртабоз. Здесь осваивались земли, были построены новые поселки. В кишлаке Шарора расположились два республиканских научно-производственных объединения «Земледелие» и «Богпарвар». Сюда протянулись нити оросительных каналов и арыков. Воду лили, не жалея. На ровном месте — это просто бесхозяйственность, а на горных склонах уже преступление. В результате сотни миллионов кубометров лессовидных суглинков постоянно находились в обводненном состоянии.

23 января 1989 г. в 2 ч 02 мин по московскому времени последовал 7-балльный сейсмический удар. На месте кишлака Окулиболо возник грязевой поток шириной около 800 м. Через 40 с после первого толчка кишлак Шарора уже был погребен под мощной толщей (8—15 м) грязи. Поток прошел двухкилометровый путь со скоростью 50 м/с и затопил кишлак Окулипоен. Объем перемещенной грязевой массы ориентировочно оценен в 1 млрд $м^3$.

Почти полностью разрушены три кишлака, погибли около 1 000 человек. На окраине Шароры был раскопан оставшийся целым дом, но до самой крыши заполненный лессовой жижей. При ходьбе по отложениям из-под сухой корки выбрызгивали грязевые фонтанчики.

Выбор средств селезащиты должен быть тщательно обоснован. Определяющий принцип — учет свойств селевой массы при взаимодействии противоселевых сооружений с потоками, которым они должны противостоять. Здесь полезно обратить внимание на примеры нашей неграмотности в этом отношении.

В 1960-е годы приобрела популярность идея о создании так называемых «сквозных селезащитных сооружений», собираемых на месте из металлических или железобетонных элементов. Идея работы такой плотины проста до глупости: сквозная плотина камни задержит, а воду пропустит. На самом деле мечта о разделении селевой массы на водную и твердую составляющие — всего-навсего милая сказка. У такого проекта было неоспоримое достоинство, оказавшееся единственным: сквозное сооружение удобнее воздвигать и оно гораздо дешевле монолитного. Опыт использования сквозных сооружений (Закавказье, Средняя Азия, Казахстан) оказался негативным, но по неизвестным причинам оставался привлекательным для проектировщиков и строителей.

Одна из таких сквозных металлических плотин, построенная в бассейне Малой Алматинки у турбазы «Горельник», оказалась на пути мощного гляциального селевого потока 15 июля 1973 г. Плотина была сметена, но при ударе в воздух были выброшены громадные камни, обрушившиеся в том числе и на турбазу. Много людей тогда погибло.

Всесоюзная селевая комиссия Госкомитета СССР по науке и технике и АН СССР решительно возражала против применения сквозных сооружений как средства селезащиты, особенно после урока 1973 г. Но инженерная мысль продолжала победно шествовать, и в июне 1999 г. почти под фанфарные звучания очередное сквозное сооружения было сдано в эксплуатацию, чтобы навсегда оградить г. Тырныауз (бассейн р. Баксан, Кабардино-Балкария, Северный Кавказ) от угрожающих ему селевых потоков р. Герхожан-су. Через два месяца, 20 августа того же года, остатки сквозного сооружения превратились в памятник неумирающей профессиональной глупости. Город же Тырныауз претерпел катастрофу.

ГЛАВА 7
МЕТОДОЛОГИЯ ГИДРОЛОГИИ

7.1. Некоторые общие методологические элементы

7.1.1. Общие положения

Соприкосновение естествоиспытателя (в нашем случае гидролога) с природой — это попытка достичь с ней некой духовной, эстетической, интеллектуальной и научной гармонии. Пребывание в состоянии такой гармонии не должно ослабевать в течение всей человеческой жизни, оно может лишь преображаться, приобретая одновременно и глубину проникновения, и широту охвата. Если такого преображения нет, то это печальный симптом. Перестав учиться, постигать что-то новое, ученый начинает приносить вред своей науке.

Рассмотрим последовательные шаги достижения такой гармонии. По мере накопления фактов мы уходим все дальше и дальше от непосредственных ощущений, и накопление наших фактов начинает все больше зависеть от выбора теории, в рамках которой они рассматриваются. Мы пытаемся собрать факты в отдельные группы и определить их общие свойства. Мы называем полученные зависимости или сформулированные утверждения законами, принципами, правилами. В процессе этой деятельности мы используем:

- общеизвестные понятия, например математические и физические;
- понятия, полезные при классификациях и обсуждениях;
- понятия и подходящие термины, которые подбираем для употребления при повседневных исследованиях;
- умозрительные идеи, которые могут оказаться очень полезными и оставаться в силе до тех пор, пока мы помним об их статусе;
- различные гипотезы, предположения и догадки, которые мы выдвигаем при объяснении явлений.

И, наконец, мы формулируем более глубоко продуманные главные концепции:

- полезные понятия и положения, получаемые при осмыслении наблюдений и экспериментов;
- системы понятий и положений — научные идеи более общего характера, вокруг которых концентрируется научная мысль;
- великие системы понятий и положений, законы и теории, достигшие широкого признания.

Здесь, видимо, уместно уделить несколько строк некоторым особенностям исторического развития науки, которое вовсе не является, как это представляется многим, чем-то равномерным и неукоснительным, а наоборот, являет собой последовательную смену приливов и отливов в борьбе мнений, периодов относительного успокоения и, наоборот, резкого обострения научных противоречий. Более глубокое понимание закономерностей развития науки пришло после выхода в свет в 1962 г. нашумевшей книги Томаса Куна «Структура научных революций», когда в научном обиходе появилось и затем быстро укоренилось слово «парадигма». Этот термин, помимо устоявшегося лингвистического и сравнительно-исторического применения, обрел новую жизнь в науковедении и в частности в методологии наук о Земле. Приведем несколько важных положений из первоисточника.

Дополнительно введен вспомогательный термин — «*нормальная наука*», это «исследование, прочно опирающееся на одно или несколько прошлых научных достижений — достижений, которые в течение некоторого времени признаются определенным научным сообществом как основа развития его дальнейшей практической деятельности». Эти достижения должны обладать двумя особенностями: «отвратить ученых на долгое время от конкурирующих моделей» и быть открытыми, чтобы «новые поколения ученых могли в их рамках найти для себя нерешенные проблемы любого вида». Именно такие достижения и приводят к новой «парадигме».

Парадигма — набор предписаний для научной группы; парадигма — общепринятый образец.

«...Много очистительной работы ... осуществляется в рамках парадигмы и как приятно выполнять эту работу». «...Наведением порядка занято большинство ученых в ходе их научной деятельности». Подобная деятельность и есть нормальная наука. «Ученые в русле нормальной науки не ставят себе цели создания новых теорий, обычно к тому же они нетерпимы и к созданию таких теорий другими».

Новые теории возникали «только после резко выраженных неудач в деятельности по нормальному решению проблем».

«...После революции ученые работают в другом мире».

«...Новые парадигмы рождаются из старых, они обычно вбирают в себя большую часть словаря и приемов, как концептуальных, так и экспериментальных». «Но они редко используют эти заимствованные элементы полностью традиционным способом».

«Обращения в новую веру будут продолжаться до тех пор, пока не останется в живых ни одного защитника старой парадигмы...».

«...Человек, который продолжает сопротивляться после того, как вся его профессиональная группа перешла к новой парадигме, ipso fakto (по одной этой причине) перестал быть ученым».

Термин «парадигма» не всегда правильно понимается. Часто им именовали просто новые концепции, кредо отдельных школ, смену акцентов и ключевых слов, обсуждение действительной или кажущейся пользы от вводимых приемов математики или других наук и разного рода увлечения в рамках все той же нормальной науки. Слово «парадигма» часто использовалось беззастенчиво и без всяких оснований. Ведь если вы перекрасите забор в другой цвет, то он все равно останется забором. Никогда не было, например, «системной» или «модельной» парадигмы, как это иногда утверждалось, ибо использование соответствующего лексикона ни в коей мере не отразилось на существенной стороне основных понятий и методов гидрологии, географии и других наук о Земле. Если же этот термин применять в описанном духе, то его введение в обиход нельзя было бы признать оправданным. В конечном счете, термин «парадигма» относится не к формальным или просто придуманным аспектам науки, а к ее внутреннему состоянию и к особенностям той кухни, где эта наука создается.

Итак, парадигма — это научное мировоззрение и мироощущение... Парадигма — это система взглядов, набор концептуальных и методологических правил и предписаний, арсенал методов и приемов, способы размышлений, распространенные единообразные тупики и ошибки, характер текстов, манера изложения... Парадигма — это общепринятый распространенный взгляд на то, что такое гидрология, какой она должна быть и каковы ее возможности и подходы.

Обсуждая далее общенаучные и общеметодологические аспекты, мы иногда позволяем себе широко цитировать не только гидрологов и представителей смежных наук, но и ученых более далеких специальностей. Более того, к последнему мы стремились особо, ибо считали это не только естественным, хотя бы в силу общности научных принципов и подходов, но в то же время с целью дать читателю ощутить дополнительные точки опоры в размышлениях отдельных видных ученых, с чьим мнением хотелось бы считаться. Ибо гидрологи не должны чувствовать себя одинокими в своих проблемах.

Когда разговор касается творческого начала в наших научных изысканиях, то часто звучат такие слова, как здравый смысл, воображение и интуиция. Не давая себя втянуть в серьезную дискуссию по поводу сущности этих понятий, все-таки зафиксируем наше к ним отношение.

Сначала о здравом смысле. Приведем несколько противоречивых мнений.

Высказывание Хаксли: «Наука — не что иное, как обученный и организованный здравый смысл» (К. Грегори. География и географы. М., 1988).

«...Геолог вынужден все больше и больше полагаться на опыт и качественное эклектическое (сочетающее разнородные иногда несовместимые взгляды и точки зрения) суждение — утонченный синоним здравого смысла» (У. Кэри. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М., 1991).

Здравый смысл необходим каждому гидрологу. «На первых этапах познания значение здравого смысла трудно переоценить. Он выступает как своего рода компас в необъятном море разрозненных фактов, а также во всех тех случаях, когда почему-либо используется скудная и неточная информация. На высших ступенях познания значение здравого смысла падает, но полностью не исчезает. Далеко за пределами обыденного ... здравый смысл ...оказывает слабую помощь и, более того, иногда служит причиной упорных заблуждений» (Р. А. Нежиховский. Теория познания и методы гидрологии. СПб., 1993).

Освоив математику «человек получил орудие труда гораздо более мощное, чем обыкновенный «здравый смысл», основанный на традиционной «домашней» логике» (Я. Б. Зельдович, И. М. Яглом. Высшая математика для начинающих физиков и техников. М., 1982).

«Здравый смысл» определен А. Эйнштейном как «комплекс предрассудков, вырабатывающихся у человека в возрасте до 18 лет».

«Науке всегда противостоит невежество, вооруженное здравым смыслом. Здравый смысл — совокупность понятий, почерпнутых из повседневного опыта, и канонизированных истин, внушаемых при стандартном воспитании» (М. В. Волькенштейн. Перекрестки науки. М., 1989).

Теперь о воображении. Всего две цитаты.

«...Нужно еще воображение (помимо эксперимента), чтобы за намеками увидеть что-то большое и главное, чтобы отгадать нежданную, простую и прекрасную картину, встающую за ними (законами)...» (Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. — Т. 1. М., 1965).

«Гораздо более свободной формой (по сравнению с мышлением) является воображение, с помощью которого придумываются теории. Именно здесь лежит источник субъективности относительно того направления, в котором развивается наука. Не существует логического пути, ведущего от опыта к теории» (Герман Вейль. Математическое мышление. М., 1989).

Итак, воображение и здравый смысл. На первый взгляд — это полезные и необходимые вещи. В приведенных контекстах Г. Вейля и Р. Фейнмана воображение — это способность мысленно представить, воссоздать, проникнуть в суть, но результатом воображения может быть и домысел, и плод фантазии. Вспомним словосочетание — «больное воображение». Подобный же дуализм содержится и в выражении «здравый смысл». Из приведенных выше

примеров со всей очевидностью следует вывод, что однозначность его понимания исключена. Действительно, каждому индивидуальному разуму соответствует свое ощущение здравого смысла: сколько голов — столько умов и столько же вариантов «здравого смысла».

А теперь об интуиции.

«Интуиция, этот неуловимый жизненный элемент, всегда активно присутствующий в творческой математике, побуждая и направляя даже самое абстрактное мышление» (Р. Курант. Математика в современном мире. М., 1967).

«Ее (физику) все глубже постигали благодаря синтезу эмпирического наблюдения с чисто математической интуицией». «Математическая интуиция чаще оказывается консервативной, нежели революционной силой, чаще сковывает, чем освобождает». «...Математическая интуиция и хороша и плоха, она необходима для творческой работы в физике и в то же время ей нельзя полностью доверяться. Причины этой двойственности заложены в природе самой математики» (Ф. Дж. Дайсон. Математика в физических науках. М., 1967).

«Иногда интуиция — тот же опыт» (Н. Н. Моисеев. Алгоритмы развития. М., 1987).

Велика роль интуиции — «чудесного сплава опыта и знаний» (Р. А. Нежиховский. Эмпирическая стадия познания в гидрологии. М., 1978).

«Интуиция — чутье, тонкое понимание, проникновение в самую суть чего-нибудь» (С. И. Ожегов. Словарь русского языка. М., 1978).

«...Интуиция, то есть непосредственное чутье истины, которое угадывает, прозревает ее, пророчески предвидит там, куда не достигает научный способ познания» (В. Ф. Войно-Ясенецкий. Что такое наука? Саранск, 1994).

«И если интуитивные попытки проникнуть в тайны Природы забываются, то факты сознательного применения логики в научных открытиях не только фиксируются как наиболее простые пути к достижению успеха, но и попадают на страницы книг и учебников. Именно по ним и учатся наши студенты. Неудивительно, что этот путь они принимают за единственно возможный» (Ганс Селье. От мечты к открытию: как стать ученым. М., 1987).

Эти несколько кратких примеров о роли интуиции в науке, конечно, не дают о ее роли полного и законченного представления. Более того, возникает вопрос — всегда ли интуиция полезна? Правда, ответ здесь очевиден: для кого как.

Так что же это такое интуиция? За ее проявление мы обычно воспринимаем неожиданный проблеск понимания самой сути дела или же более устойчивую картину видения чего-то похожего на истину. Интуитивное озарение, интуитивное восприятие действительности — это всегда награда за долгий и кропотливый труд, за

верность науке, за энтузиазм, за любовь к предмету исследований, за близкое к правильному состояние души. И всегда это дар, чаще всего не совсем заслуженный, иногда авансированный. И к не пережившему после интуитивной вспышки состояния радости и благодарности способность к интуитивным разрешениям задач и проблем может и не вернуться.

Многие представители ученого мира часто не прочь поддержать разговор об интуитивных озарениях, но, судя по их трудам, в их искренность не всегда можно поверить. Поэтому мы чаще всего интуитивно скрываем от окружающих правду о проявлениях своей интуиции. Последняя, хотя тогда вряд ли ее следует считать интуицией, скорее всего не может ввести исследователя в заблуждение, очевидно здесь срабатывает что-то другое, например измена самому себе, а точнее тем принципам, которые всегда считала правильными лучшая часть человечества.

7.1.2. О математике в гидрологии

Сразу хотим обратить внимание на два противоречащих друг другу варианта «математизации» гидрологии и других наук о Земле. Первый, к сожалению не самый распространенный, — это тот случай, когда математические методы и приемы естественно и без насилия входят в плоть и кровь гидрологии. Второй же — предмет злоупотреблений некоторых «обучившихся» гидрологов, но часто и математиков, не нашедших себя в математике и считающих, что в гидрологии, куда они пришли, им все дозволено. Где-то здесь вырисовывается и некий собирательный образ гидролога, затратившего на освоение какого-нибудь раздела математики много сил и времени, и который, может быть иногда даже и на уровне подсознания, требует, чтобы его наука немедленно расплатилась с ним за проявленные усилия. Математические методы в последнем случае как бы «приклеиваются» к телу гидрологии, сопровождают ее и мешают ей в развитии.

Математика не просто полезна гидрологу, она ему крайне необходима, но несет с собой для него не только благо, но и определенную опасность. Здесь полезно расширить наш взгляд на присутствие математики в гидрологии, ибо гораздо важнее, чем просто пользоваться формальными математическими приемами (особенно в форме «пакетов» прикладных программ), математизировать свой образ размышлений на уровне формулировок исходных идей.

А дальше нам хотелось бы предложить вам, читатель, ряд цитат, представляющихся очень выразительным дополнением к нашим размышлениям о том, что такое математика для гидрологии и других естественных наук. Специально хотим заранее отметить

важность идеи о приоритете простейших решений перед сложными, хотя часто и внешне наиболее респектабельными.

«Математика — естественная наука» (Герман Вейль. Математическое мышление. М., 1989).

«Математика не относится к естественным наукам» (Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. — Т. 1. М., 1965).

«...Все рисуемые наукой картины природы, которые только могут находиться в согласии с данными наблюдений, — картины математические...» (Дж. Джинс. Загадочная Вселенная, М. Клайн. Математика. Поиск истины. М., 1988).

«...Глубокое понимание математических соотношений, в конце концов, необходимо для понимания природы» (Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. — Т. 2. М., 1965).

«...Природа представляет собой реализацию простейших математически мыслимых элементов» (А. Эйнштейн. Собрание научных трудов. — Т. 4. М., 1967).

«Мы должны стремиться давать не просто описания явлений, а наиболее простое из возможных описаний». (Н. Н. Моисеев. Математика ставит эксперимент. М., 1979).

«Возможно, нет более коварного и опасного обмана, чем сложный и изящный математический анализ, построенный на неосновательных предпосылках» (Т. Чемберлен, У. Кэри. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М., 1991).

«...По злой шутке британской академической истории чрезвычайно много из того, что шло под этим именем (прикладная математика), не было ни математикой с какой-либо концептуальной целостностью, ни приложением к чему-либо практически важному или к области, где можно было бы экспериментально проверить, верно оно или неверно» (Тим Постон и Иэн Стюарт. Теория катастроф. М., 1980).

«Во всех случаях математика используется для разукрашивания гидрологических проблем, а не для их решения».

«В гидрологии каждый новый математический метод оставлял после себя в наследство погрешности, объявляемые как научные открытия» (V. Clemes, 1986).

7.1.3. Теория в гидрологии

Жизненно важен для развития современной гидрологии вопрос: существует ли в настоящее время теория гидрологии (геологии, метеорологии, океанологии, географии), и если существует, то что это такое?

Классифицируем варианты методологии наук о Земле по уровню рассмотрения предмета ее исследований:

1) эмпирико-описательный;
2) теоретический заимствованный;
3) теоретический собственный.

Первому уровню отвечает гидрология, которую условно назовем «традиционной». Это та гидрология, основы которой в более или менее явной форме были заложены в 30—50-е годы XX в. и которая во многом сохранила свои позиции и в настоящее время. Второму уровню соответствует теоретическая основа, почти в чистом виде импортированная из механики, гидродинамики и математической физики, но, в первую очередь, из математической статистики. Третий уровень только еще угадывается, хотя крупицы его проявления можно было заметить и в рамках традиционной гидрологии. Дальнейшие наши рассуждения будут касаться в основном собственной гидрологической теории.

Ганс Селье (От мечты к открытию: как стать ученым. М., 1987) дал образное определение: «Теории — это нити, которые связывают имеющиеся факты». Теории зарождаются, живут полной жизнью, испытывают недомогания и иногда умирают. Сначала — это мысленные системы, согласующиеся с экспериментальными данными, постепенно развивающиеся и превращающиеся из чисто умозрительных соображений в форму общего знания. Значение высокой теории состоит не только в плодотворности ее предсказаний, но и в чувстве уверенности, которое она приносит с собой. Лучшая из теорий та, которая наиболее проста, доказательна, красива, экономична, доступна пониманию и приносит наибольшее интеллектуальное удовлетворение.

Итак, естественнонаучная теория — взаимоувязанная замкнутая система научных понятий, принципов, концепций, гипотез, идей, методов и терминологии, обобщающая закономерности существования и развития природы в условиях воздействия на нее человеческого общества в рамках конкретной дисциплины или ее раздела в цикле наук о Земле. Основной язык теории — математический.

В свое время Людвиг фон Берталанфи (отец системного подхода) опрометчиво выдвинул лозунг о полезности так называемых «словесных теорий»: «Достоинства математических теорий — их недвусмысленность, возможность строгих выводов, проверяемость данными наблюдений — хорошо известны. Но из этого вовсе не следует, что теории, сформулированные с помощью обычных языковых средств, следует презирать или отбрасывать. Словесная теория лучше, чем отсутствие теории как таковой, или чем теория, которая потому только, что ее можно записать математически, навязывается принудительно и в результате искажает действительность» (Ludwig von Bertalanffy, 1968).

Эту сентенцию любят цитировать, а географы особенно благоговейно, так как она на гребне волны общей теории систем как бы утвердила право на существование «словесных теорий». Но давайте, отбросив эмоции, более пристально посмотрим на эти три процитированные фразы. Действительно, сразу следует согласиться, что «принудительные теории», которыми, к сожалению, изобилуют все науки о Земле, в том числе и гидрология, не только искажают действительность, но попросту вредны, ибо засоряют научное пространство. Но из этого вовсе не следует вывод, что немедленно следует приветствовать словесную теорию как наименьшее зло. Что же такое «словесная теория» в науках о Земле? Это даже не паллиатив, а просто отдельные проявления пребывания этих наук в описательном состоянии. Ну а желание словесные построения называть «теорией» — это не просто дело вкуса или моды, а скорее просто несостоятельная и вредоносная претензия.

Вообще-то разграничение пользы и вредности математики для наших теорий на первый взгляд весьма замысловато. И пройти через минное поле плюсов и минусов математизации отнюдь непростое дело. Здесь не может быть рецептов, но должна присутствовать уверенность в том, что настоящий ученый всегда сумеет оптимально решить для себя эту задачу. Но то, чем такое разграничение обычно заканчивается, вызывает у думающих людей нешуточное беспокойство. Обратимся к вопросу, что мы должны понимать под теорией и насколько последняя должна быть математизирована? Часто говорят о близости понятий «теория» и «закон». Конечно же, это не так, если говорить о теории, а не о каком-то фрагменте. Теория обычно зиждется на некой совокупности законов. И еще любят сопоставлять определения «теория» и «модель». Например, можно привести такое высказывание:

«Теорию в ее эмбриональной форме часто называют "моделью"» (Дж. Б. Мэрион. Физика и физический мир. М., 1975).

Вообще-то идеальный вариант состоит в том, что на базе имеющейся теории следует строить модель. Но это не всегда возможно, так как подходящей теории под рукой может и не оказаться. В этом случае одновременно с конструированием модели закладываются и основы теории. Вырисовывается следующий тезис: чем большая часть некой теории находит свое отражение в математической моделирующей системе, тем меньше различие между этой теорией и ее порождением — моделью. Вообще же язык моделирования плюс словесные пояснения, рассуждения, сравнения и обоснования и есть язык теории.

Текстовая часть теории должна использовать терминологию конкретной отраслевой науки, в данном случае гидрологии, а не быть изложенной на языке, принятом в строгих специализированных математических работах. Речь идет, конечно, не об использовании избранных математических терминов, что естественно

и необходимо, а о языке и форме изложения, понятных только математикам с узкой специализацией.

А как обстоит дело с теорией в гидрологии и сопредельных науках? В свое время М. А. Великанов (Гидрология суши. Л., 1948) среди четырех методов гидрологии (наряду с экспедиционным, стационарным и экспериментальным) назвал «теоретический анализ, как вытекающий из обработки данных и эксперимента, так и строящийся непосредственно из основных законов физики и механики». Вообще в гидрологической и родственной литературе слово «теория» встречается не столь уже редко, но обычно за этим мало что стоит. Среди достаточно крупных работ, в названиях которых непосредственно присутствует слово «теория», можно назвать буквально единицы, например:

М. М. Протодьяконов. Теория стока поверхностных вод. М., 1932. Основные положения современной теории стока поверхностных вод. М., 1940.

А. Н. Бефани. Основы теории ливневого стока. — Ч. I. Одесса, 1949; Ч. II. Л., 1958.

Можно ли эти работы отнести к подлинно теоретическим? Очень условно, тем более что названные публикации давно устарели. В течение последних тридцати лет слово «теория» гидрологи упорно избегали по вполне очевидным причинам.

Из гидрологов, которые уделили внимание теоретическому аспекту, мы можем назвать Р. А. Нежиховского (Теория познания и методы гидрологии. СПб., 1993). Он определил теорию как «упорядоченную совокупность накопленных знаний», хотя упорядочить можно и совокупность чисто наблюдательных, эмпирических и географических сведений и что «в целом мы принуждены констатировать, что теоретические пути решения ... пока ограничены».

Только появление математических моделей инициировало и возникновение задатков теоретической гидрологии. Другое дело, что многие модели и теоретические наброски пока еще несовершенны и не всегда адекватны природе. А как обстоит дело в сопредельных науках? Думаем, что теоретический аспект достаточно выражен в гидрофизике, метеорологии и океанологии. В географии же незаимствованных теоретических признаков не заметно. Утверждение, что в их науке (за исключением картографии конечно) какая-либо теория отсутствует, обычно вызывает у географов реакцию, напоминающую таковую у людей, которым сообщили, что они лишены чувства юмора. В качестве примера необоснованного оптимизма, касающегося развития теории географии, приведем слова Дэвида Харвея (Научное объяснение в географии. М., 1974) о том, что построение теории в географии («без теории мы едва ли можем претендовать на признание нашей собственной индивидуальности») в широком впечатляющем масш-

табе — «первейшая задача в текущем десятилетии» (издано в Лондоне в 1969 г.) и «пусть нашим лозунгом на 1970-е годы будет: «Вы узнаете нас по нашим теориям». Нет, мы так и не узнали географов по их теориям ни в 70-е годы, ни в последующие десятилетия.

7.1.4. Существующие и несуществующие законы

«Понятия физики и ее законы лежат в основе всего естествознания» (Физический энциклопедический словарь. М., 1983).

«...Все процессы, протекающие в неживой природе, подчиняются законам физики и химии. И только им!» (Н. Н. Моисеев. Алгоритмы развития. М., 1987). Этот общенаучный тезис неоспорим и должен быть узаконен для ученого мира. Тем не менее в различных науках о Земле существует ложное подспудное ощущение, что законы — это непременный атрибут каждой отрасли науки.

Как всегда более категоричны географы. Вспомним выдвинутый А. А. Григорьевым и М. И. Будыко «периодический закон географической зональности». ДАН СССР. № 1, 1956). Тут даже нет формулировки «закона», только название. Вообще-то географическая зональность как наблюдаемый факт была констатирована на нашей планете с незапамятных времен. Тем не менее как географический закон он признан многими географами. Упомянем о других несуществующих законах.

Географических:

- целостности географической оболочки и взаимной обусловленности ее компонентов;
- территориальной дифференциации;
- трансформации потока солнечной энергии в биогеоценозе;
- устойчивости функционирования геосистем или регуляторных функций отдельных подсистем;
- энтропии геосистем;
- числа потоков Хортона;
- Крумбейна (о формировании профиля пляжей);
- Пенка (об отступании склонов);
- эволюции ландшафта.

Гидрологических:

- водного баланса;
- теплового баланса;
- квадратичного сопротивления в турбулентных водных потоках.

Все перечисленные законы либо представляют собой сформулированные концепции или гипотезы, или же являются следствием истинных законов.

Иногда термину «закон» вообще не придается какая-либо значимость, и он используется как бы между прочим. Нет общепринятого критерия, определяющего нечто как закон или не закон.

Все вышеприведенные примеры свидетельствуют о том, что понятие «закон» пронизывает всю науку и в то же время используется достаточно вольно. Попытаемся предложить некоторые определения. ***Закон*** — краткое утверждение, определяющее сущность элементарных явлений и процессов в их взаимосвязи с влияющими аргументами и распространенное несколько за пределы известных фактов; помимо словесного всегда имеет математическое выражение. Различаются следующие уровни:

- универсальные физические законы (законы природы);
- физические законы с ограниченной областью действия;
- феноменологические законы с ограниченной областью действия, обоснованные эмпирически и частично теоретически.

Соотношение — выявленное в результате анализа наблюдений и экспериментов представление о взаимосвязи элементарных процессов и явлений в ограниченной области действия; как правило, относится к определенной области науки и всегда требует соответствующей математической аппроксимации. Различаются следующие уровни:

- полуэмпирические (интерполяционные) соотношения;
- эмпирические (экстраполяционные) соотношения.

Элементарное явление (элементарный процесс) — основное, очищенное от множества сопутствующих деталей, рафинированное, выделенное из сложной системы природных явлений.

Концепция — система взглядов на процессы и явления и на причины, их обусловливающие.

Нельзя не упомянуть о довольно неопределенном слове «закономерность», которое часто и столь необдуманно ставят рядом со словом «закон». Р.А. Нежиховский (Теория познания и методы гидрологии. СПб., 1993), например, отмечает, что «в гидрологии не принято употреблять термин «закон», но часто используется выражение «закономерность», которое трактуется «как многократно повторяющийся научный факт». О «законах» Нежиховского уже сказано выше, теперь полезно обсудить и слово «закономерность». Сразу оговоримся, что приведенное выше определение представляется неудачным. Действительно, если констатация фактов — это установление наличия или несомненности чего-либо, то многократная констатация вряд ли изменит ситуацию, ибо факт не изменится будучи многократно повторенным. Однако, что же такое «закономерность»? В этом слове присутствуют два оттенка, поэтому, видимо, достаточно правильными будут такие формулировки:

- это подмеченная особенность процесса, явления или структуры объекта в зависимости от определяющих их факторов;

• это проявление физических законов в сложных объектах, процессах и явлениях.

В конечном счете, закономерность — это то, что мы пытаемся обнаружить при первичном гидрологическом анализе. И, конечно же, ***закон*** и ***закономерность*** есть понятия различного уровня, хотя Нежиховский явно воспринимает последнее как некий не совсем совершенный закон. Среди «некоторых важных закономерностей в гидрологии» он, например, перечисляет следующие:

• редукцию модуля максимального расхода по площади водосбора;

• закон числа водотоков различного порядка Хортона;

• регулирующее влияние озера на гидрограф стока из него.

Можно, конечно, рассматривать перечисленные факты как подлинные закономерности, хотя все три имеют несомненное теоретическое объяснение. Вообще же, отслеживание закономерностей — неизбежный этап, предшествующий выявлению соотношений, а иногда и законов.

7.1.5. Системный синдром

В большинстве работ по математическому моделированию процессов стока так или иначе читателю дают понять, что авторы в какой-то мере руководствовались принципами системного анализа. Ознакомившись с работами, составить об этом более полное представление невозможно. Остается невыясненным, действительно ли модельеры нуждались в помощи системного анализа или только сочли для себя полезным обозначить приобщение к нему.

После 1950 г. в научной общественности наблюдалось большое смятение в связи с появлением *«общей теории систем»* и связанных с ней понятий *«системного подхода»* и *«системного анализа»*. Д. Харвей в книге «Научное объяснение в географии» (1974) писал, что «... системный анализ окажется одной из важнейших методологий второй половины двадцатого века». Возникли максималистские воззрения в геологии, географии, гидрологии и других науках о Земле, фетишизирующие роль и возможности системного подхода. Приведем некоторые изречения подобного толка.

«Без структурного, функционального и динамического аспектов системного подхода к геологической среде невозможно разрабатывать ни теоретические проблемы ... физической геологии, ни важнейшие ее прикладные вопросы...» (Г. К. Бондарик. Общая теория инженерной (физической) геологии. М., 1981).

«... сумей географы правильно осмыслить свои задачи с точки зрения теории систем, они смогли бы обратить на них всю мощь системного анализа» (Д. Харвей, 1974).

«... системному подходу по самой его сути присуща огромная, в некотором смысле всеобъемлющая, широта охвата научных проблем» (В. Н. Солнцев. О трудностях внедрения системного подхода в физическую географию. — Вопросы географии, 1977).

Все эти сентенции чрезмерны. Но почти фанфарного звучания апологетика системного подхода достигла у Д. Клира (Наука о системах: новое измерение науки. М., 1983). Им человеческая история была разбита на три периода, различающихся по характеру господствующей науки:

1) «донаучный» (до XVI в.) — время здравого смысла, проб и ошибок, дедуктивных рассуждений, акцентов на традиции;

2) «одномерной науки» (с середины XVII до середины XX в.) — период экспериментов и дифференциации научных дисциплин;

3) «двухмерной науки» (с середины XX в.) — время возникновения науки о системах и интеграция этой новой науки с традиционными научными дисциплинами.

Д. Харвеем были высказаны недоказанные и недоказуемые утверждения, которые он посчитал «неоспоримыми». Среди последних особо показательны следующие:

• системный анализ «охватывает формулировки традиционной науки»;

• приемы системного анализа «распространяются на такие дисциплины.., в которых взаимодействия настолько сложны, что их невозможно исследовать с помощью традиционных научных методов»;

• «возможности системного анализа ... определяются той многозначностью, которая окружает системные концепции...».

Особая привлекательность системного анализа для определенных кругов научного мира была обеспечена следующими главными обстоятельствами:

• страстным подспудным желанием появления общенаучной методологической панацеи;

• доступностью, почти примитивностью, понятий системного подхода;

• настолько широким определением понятия «система», что она отвечала всем мыслимым объектам;

• расплывчатостью принципов и правил подхода, что позволяло свободно и безнаказанно проявлять свою индивидуальность.

С популярностью системного анализа могла соперничать только его неопределенность. Поэтому столь противоречиво отношение к нему и столь туманен результат полувека его присутствия в науке. Казалось бы, что назвать любой объект «системой» — это беспроигрышное утверждение. Но давно известно, что «все означает ничто». Поэтому так и осталось недосказанным, что же это такое системный подход (системный анализ, общая теория систем):

• мировоззрение (Харвей);

• схема унификации всего научного мышления (Харвей);
• принципиальная доктрина (Берталанфи);
• научная дисциплина (А. К. Бисвас. Системный подход к управлению водным хозяйством. М, 1985)?

Сыграл ли системный подход столь решающую роль для существенного подъема науки во второй половине XX в., как это предсказывал Харвей? Что бы ни утверждали апологеты системного подхода, не сыграл. Сейчас уже можно, подводя итоги, все, что относится к системному анализу и подходу, условно разделить на три сектора, отличающихся друг от друга принципиально и существующих почти параллельно.

Сектор первый. Здесь используется само понятие «система», преобладают компиляционные разъяснения, присутствуют многочисленные термины, рассуждения и ссылки. Характерно выдвижение призывов и лозунгов. Поскольку основная масса случаев «применения» системного анализа в науках о Земле, к сожалению, относится именно к этой категории, мы уделим последней особое внимание.

Сектор второй. В его рамках практически отождествляются понятия системного анализа и математического моделирования процессов и явлений, причем последнее осуществляется в основном представителями отраслевых наук. Ссылки на системный подход в этом случае носят весьма формальный характер и по большому счету они не нужны.

Сектор третий. Здесь теория систем воспринимается как раздел прикладной математики, где математические модели разрабатываются математиками в плане развития теории их науки.

Считаем полезным обратиться к некоторым соображениям и репликам философа и специалиста по методологии науки Г. П. Щедровицкого (Избранные труды. М., 1995).

Системный подход и системный анализ — это разные стороны того явления, которое в свое время было названо «системным движением», и объединившим представителей разных профессий. К главным мотивам такого объединения отнесены:

• попытки найти поддержку среди деятелей других наук, если осталось неосознанным свое место и не найдено взаимопонимание в своей собственной науке;
• попытки пойти по пути наименьшего сопротивления и позаимствовать средства решения своих научных проблем на стороне.

Поставлен вопрос о том, что все-таки объединяет людей под флагом системного движения? Ответ в основном состоит из отрицаний: это не единство в логическом и эпистемологическом плане (эпистемология — теория познания), не единство объектов изучения, не единство средств и методов мышления. Это исключительное единство того, что называют «системной ориентацией» и «системной идеологией».

Моменты уязвимости системного движения:

• что, в конце концов, мы ожидаем от системного движения, чем оно должно завершиться? (именно здесь завязывается узел основных противоречий системного движения и заложен основной источник конфликта между его участниками);

• системное движение как «интердисциплинарное» и «интерпрофессиональное» образование должно «создать продукт, выходящий за рамки каждой отдельной профессии» (и в этом заключено главное возражение в адрес системного движения).

А вот замечание, свидетельствующее о неслучайности появления системного движения, более того, о некой закономерности, проявляющейся в разное время и в разной форме. В связи с существующим стремлением к интеграции наук возлагались надежды, что некая «наука» преодолеет границы между традиционными науками и выработает общие принципы, представления и язык. Новейшая история науки свидетельствует, что такие надежды возлагались, например, на *кибернетику.*

«...Думаю, и даже убежден, что эти надежды не оправдаются и в отношении нынешнего варианта системного подхода» (Г. П. Щедровицкий. Избранные труды. М., 1995) (первая публикация датируется 1974 г.).

Итак, кибернетика как метанаука не состоялась, да и не могла состояться, системный подход как общенаучная панацея реанимируется только ветеранами системного движения. Не очень ясен принцип преодоления межнаучных границ и барьеров, но стремление к интеграции наук не ослабевает. В принципе оно может быть удовлетворено разными способами. Но, наверное, только один из них не является ложным. Предположительно он должен сводиться к взаимопроникновению, своего рода диффузии, наук. Но насколько легче и вожделенней представить себе свою собственную привычную (традиционную или видоизмененную) науку как бы господствующей над рядом других и наделяющей последних своими «великими откровениями».

Расставаясь с проблемой «системного синдрома», хочется спросить: неужели все — это лишь расплата за ничем не ограниченное использование понятия «система»? Ведь все, что оно означает и что о нем можно сказать, содержится в любом толковом словаре русского языка.

7.1.6. Наивный информационизм

С печальными и небезвредными искажениями приходится сталкиваться в связи с неправомочным применением в географии и других науках о Земле некоторых основ теории информации. Ошибочно предполагается, что природная система, если она является

динамичной, может рассматриваться как информационная, а любое изменение состояния природного комплекса можно изучать как процесс получения и переработки информации. Напомним о статистической сути двух основных понятий, интересующих нас в затронутом контексте, — энтропии и информации.

Будем иметь в виду простейшую систему X с непрерывным множеством состояний x, на вход которой поступает непрерывное воздействие. Мера неопределенности состояния системы, называемая энтропией, выражается следующим образом:

$$H(x) = -\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) \log[k\varphi(x)]\, dx, \qquad (7.1)$$

где $\varphi(x)$ — плотность вероятности состояния системы, описываемой одной непрерывной случайной величиной x; k — нормирующий множитель; основание логарифма и значение k произвольны и для нас значения не имеют.

Условная энтропия в случае конкретного воздействия $Z = Z_c$ определяется аналогично (7.1):

$$H(x/Z_c) = H(x/Z_c) = -\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x/Z_c) \log[k\varphi(x/Z_c)]\, dx.$$

Тогда величина

$$I(x/Z_c) = H(x) - H(x/Z_c)$$

есть количество информации, содержащееся в нашем представлении о факте появления на входе системы X воздействия $Z = Z_c$.

Случилось так, что понятие «информация» превратилось «прямо-таки в модное слово, которое используется не только тогда, когда без него вполне можно обойтись, но даже и тогда, когда оно лишь усложняет объяснение феномена». Все явления в неживой природе могут быть объяснены и поняты без привлечения понятия информации и описаны только на языке физики и химии. «Только тогда, когда существует цель, полностью раскрывается значение, ценность и смысл информации». Слова, отмеченные кавычками, принадлежат Н. Н. Моисееву (Алгоритмы развития. М, 1987).

Вроде бы бессмысленность перевода описания природных процессов на язык теории информации вполне очевидна (аппарат-то остается тот же самый — статистический), но некоторые географы убеждены, что в рамках географического анализа они должны исследовать в природе потоки вещества, энергии и информации. Судя по всему, мы еще далеки от излечения.

Закончим этот раздел еще одной цитатой, в которой даже дано определение того явления в наших науках, которое мы с вами

только сейчас обсудили: «Сторонники наивного «информационизма» считают, что посредством привлечения понятия информации они смогут или должны дать объяснение всего на свете» (Ф.Л. Бауэр, Г. Гооз. Информатика. Ч. 1. М., 1990).

7.2. Вода в трех «геосферах» и особенности описания ее динамики

Гидрологический цикл — круговорот воды в природе охватывает три главные земные сферы (геосферы): атмосферу, гидросферу и литосферу, соответствующие трем античным стихиям (воздуху, воде и земле) и трем основным состояниям вещества (газообразному, жидкому и твердому). В определениях всех трех сфер отсутствуют четкость и определенность. И хуже всего дело обстоит с концепцией гидросферы.

Гидросфера — это водная оболочка Земли, расположенная между атмосферой и литосферой. Обычно считается, что она включает в себя моря и океаны, воды рек, озер и других водоемов на территории суши; снег, лед, ледники; почвенные и подземные воды; водяные пары, облака и осадки в атмосфере; ювенильные и химически связанные воды; воду в живых организмах (Толковый словарь английских геологических терминов. Т. 2. М., 1978; Р.К. Клиге, И.Д. Данилов, В.Н. Конищев. История гидросферы. М., 1998). Это очень формальное перечисление. Можно было бы просто констатировать, что гидросфера — это вся вода на Земном шаре в любом ее состоянии. Но именно в этот момент хочется задать вопрос, который, в зависимости от разделяемой читателем системы взглядов, может показаться и принципиально важным, и не заслуживающим внимания. Этот вопрос о том, что мы все-таки склонны понимать под названием «сфера»? Вряд ли мы имеем в виду замкнутую поверхность, все точки которой одинаково удалены от некоего центра (математическое определение сферы), скорее как область распространения чего-либо. И все-таки, полагая второе определение многих земных сфер приоритетным или даже единственным, мы одновременно находимся в плену и у первого. Иначе почему, говоря о геосферах, мы сразу представляем себе небесную сферу и сферические поверхности океана или суши, которые мы видим под крылом самолета?

Мы чувствуем дискомфорт, когда, даже мысленно находясь в какой-то точке пространства, должны полагать, что одновременно пребываем в двух геосферах, например в атмосфере и гидросфере: «верхняя граница гидросферы практически совпадает с верхней границей атмосферы» (Клиге и др.). Вопрос о том, что в данном элементе земного или околоземного пространства одновременно

присутствуют две или даже все три основные геосферы, достаточно серьезен. Если просто оставаться в рамках «плетения словес», то это еще почти безобидно. Но если, например, обратиться к вопросу о физических свойствах геосфер или каким-нибудь другим существенным аспектам, то это может стать серьезной помехой при теоретических обобщениях. Обычно это преодолевается «забыванием» взаимоотношения конкретностей с «породившими» их геосферами. Если же конкретности являются артефактами, то всегда важно определить, в пределах какой геосферы они находятся.

При выделении дополнительных «сфер», сверх трех основных вышеназванных, следует иметь в виду все возрастающую условность такого акта несмотря на то, что при этом мы вступаем в противоречие с уже устоявшейся привычкой довольно вольно использовать такие термины, как «биосфера», «криосфера», «ноосфера» и др.

В дефиниции понятия «гидросфера» обычно присутствует слово «оболочка», представляющая собой уже не поверхность, а некий слой. И здесь появляется неопределенность: оболочка «непрерывная» (Клиге и др.) или «прерывистая» (Словарь иностранных слов. М., 1989)? С нашей точки зрения, если уж «оболочка», то все же непрерывная, пусть и не распространяющаяся полностью на все планету. А об обрывках гидросферы в пределах других сфер следует поговорить специально. С этой точки зрения определения трех главных геосфер должны быть уточнены и дополнены. И если атмосфера как воздушная оболочка Земли являет собой нечто цельное и единое, то разделение пространства между сушей и океаном уже не столь очевидно.

Гидросфера:

- собственно гидросфера — это Мировой океан; здесь полностью удовлетворяются условия сферичности, протяженности, непрерывности и сплошности;
- автономные элементы первого порядка: внутренние моря, реки, озера и ледники на поверхности континентов;
- автономные элементы второго порядка — реки, озера и ледники на островах в океане;
- агенты в атмосфере — водяные пары, облака и осадки;
- агенты в литосфере — почвенные и подземные воды в любом фазовом состоянии.

Гидросфера обладает фундаментальной особенностью — ее вещество (вода) при реальных на Земле температурах может быть и твердым, и жидким, и газообразным. Она очень медленно, но неуклонно пополняется за счет ювенильных вод, восходящих из мантии или глубинных частей земной коры, и за счет вод, захороненных в исходных породах до их метаморфизма.

Для гидросферы существует и иное определение, геологическое. Оно звучит, как минимум, своеобразно: «Гидросфера Земли —

... квазизамкнутое множество, обособленное в космическом пространстве и в то же время генетически с ним связанное, возникающее из него и уходящее в него». В состав «гидросферы как геологической системы» входят атмосферные, поверхностные и подземные воды. «Они существуют как самостоятельные квазизамкнутые миры, которые связаны своеобразными микротуннелями, представленными частичками пара и изолированными парожидкими микроструйками в атмосфере и пористых, трещиноватых горных породах. Функционирование этих туннелей контролируется различными физико-химическими и биологическими процессами. Если на взаимосвязь составляющих гидросферы посмотреть с более широких геологических позиций, то станет очевидным, что она реализуется в виде общего круговорота воды на Земле» (А. Н. Павлов. Геологический круговорот воды на Земле. Л., 1971). Таким образом, параллельно с круговоротом воды в природе — гидрологическим циклом — существует понятие «геологический круговорот воды на Земле» (слово «круговорот» здесь геологи используют зря, ибо это приводит к некоторой путанице при восприятии геологических текстов не геологами), что соответствует участию воды в «геологическом цикле».

Гидрологический и геологический циклы — явления резко разномасштабные. В первом случае характерный отрезок времени имеет астрономически обусловленный размер — год, во втором — он составляет довольно неопределенный отрезок геологического времени (термин «геологическое время» подразумевает предельно большое погружение в прошлое), в течение которого начинаются и заканчиваются явления, воздействующие на земную кору и приводящие к приобретению последней определенных геологических и гидрологических свойств и особенностей.

Мы здесь вынуждены констатировать, что параллельное существование различных трактовок одного и того же объекта, процесса или явления в различных науках о Земле представляет собой настоящее бедствие, свидетельствующее о неудовлетворительном взаимодействии этих наук.

Литосфера:

•литосфера на поверхности Земли представлена континентами; то, что она еще фигурирует в качестве ложа океана, в рассматриваемом аспекте для нас несущественно;

• автономные элементы первого порядка — острова в морях и океанах;

• автономные элементы второго порядка — острова во внутриконтинентальных морях и озерах;

• агенты в атмосфере — вулканический пепел и пыль, поднимаемая ветром;

• агенты в гидросфере — речные наносы и мутьевые потоки, различные минеральные растворы.

Говоря об элементах гидросферы и литосферы первого и второго порядков, можно утверждать, что существуют и элементы более высоких порядков и, хотя в данном случае это не имеет практического значения, рассуждения о существовании здесь некоторой иерархической цепочки самоподобия ведут к фрактальным представлениям.

Особо отметив цельность и единство атмосферы, следует указать на наличие ее агентов в гидросфере (растворенные атмосферные газы, пузырьки воздуха) и литосфере (воздух в карстовых полостях, поровом пространстве почвы, трещинах скальных массивов).

Физическое состояние трех сфер влечет за собой особенности в концепциях и математических моделях процессов и явлений гидрологического цикла в их пределах. Поскольку три сферы в обычных условиях на Земле соответствуют трем основным агрегатным состояниям вещества — газообразному (частицы слабо связаны силами взаимодействия и движутся свободно, заполняя предоставленный им объем), жидкому (сохраняет объем, принимает любую форму, обладает свойством текучести), твердому (характеризуется стабильностью формы), то между гидросферой и атмосферой гораздо больше сходства, чем между ними и литосферой. Вода и воздух объединяются теоретической физикой в некоторую общность, называемую жидкостью в физически широком понимании этого слова. Характерное свойство жидкости — легкость ее деформации. Твердое же тело стремится сохранять определенную форму, которая может изменяться только при очень сильном воздействии со стороны внешних условий.

Для объяснения макроскопических явлений в таких текучих веществах, как вода и воздух, не учитывается их молекулярная структура, а предполагается, что они *непрерывно* распределены по всему занимаемому ими объему и целиком занимают этот объем. Концепция сплошности вещества является основным постулатом механики сплошной среды (континуума). Эта концепция приводит к тому, что поля всех переменных состояния сплошной среды выражаются непрерывными функциями координат и времени. При этом подразумевается, что *точка* есть место в пространстве, а *частица* — малая часть материального континуума. Если в данной системе координат указано соответствие частиц некоторого объема сплошной среды и точек пространства в какой-то момент времени, то это означает, что для этого момента задана *конфигурация* сплошной среды.

Действительно, «... структура и свойства воздуха и воды... настолько непрерывно и плавно изменяются.., что никакая другая гипотеза не будет естественной» (Дж. Бэтчелор. Введение в динамику жидкости. М., 1973).

Арсенал необходимых уравнений для описания состояния и динамики сплошной среды таков:

• определяющее (характеризующее физические свойства конкретной сплошной среды, в частности устанавливающее математическое соотношение между напряжениями и деформацией);
• неразрывности;
• движения (при отсутствии ускорения — равновесия);
• энергии;
• состояния (функционально связывающие переменные состояния системы).

В частности, для воды как ньютоновой и несжимаемой жидкости (хорошо оправдывающееся приближение) совмещение определяющих уравнений и уравнений движения приводит к известным *уравнениям Навье—Стокса*, которые вместе с уравнением неразрывности образуют полную систему четырех уравнений с четырьмя неизвестными (давлением и тремя компонентами скорости). В рамках каждой конкретной задачи решение этой системы должно удовлетворять граничным и начальным условиям.

Итак, с одной стороны, мы имеем общие уравнения поведения воды и воздуха во времени и пространстве, с другой — граничные условия. И если первые всегда одни и те же (за исключением формы записи, вариаций при упрощении, учета эффекта сжимаемости), то вторые могут быть очень разнообразными. Какова же роль граничных условий и насколько важна четкость и точность их задания (теоретическая и практическая)? Практика моделирования свидетельствует, что стремление принять граничные условия чрезмерно простыми и «удобными» и сосредоточить внимание на численных схемах и других формах математической изысканности, как правило, приводят к плохим результатам. Часто адекватность математической модели природе зависит почти исключительно от способа и формы описания режима на границах сплошной среды при той или иной ее конфигурации. Вообще же роль граничных условий в различных ситуациях не одинакова. Она определяется размерами скоплений воды или воздуха и их конфигурацией.

В самом общем виде можно выделить три варианта — два крайних и один промежуточный:
• условно неограниченные скопления, находящиеся вне зоны влияния твердых границ;
• относительно ограниченные скопления, взаимодействующие с твердыми границами и телами;
• сильно ограниченные скопления в условиях определяющего воздействия на них твердых границ и структур.

Характерные объекты, которым соответствуют три названных варианта:
• свободная атмосфера, открытый океан;
• приземный слой атмосферы, окраинные моря, шельф, проливы, эстуарии, озера, участки больших рек;

• реки и ручьи, внутрипочвенный воздух и воздух в трещинах, пустотах и полостях горной породы, почвенные и подземные воды, селевые потоки.

В первом варианте роль твердых граничных условий, которые маячат лишь где-то на дальних горизонтах, не является определяющей. В свободной атмосфере и открытом океане распространение возмущений в любую сторону ничем не ограничено и зависит только от действующих сил, вызванных любыми эффектами, в том числе и теми, которые воспринимаются как случайные или хаотические. В принципе океан и атмосфера обладают общими гидродинамическими свойствами, несмотря на очевидные различия состава, формы и термодинамических характеристик (Г.П.Уильямс. Динамика климата. Л, 1988).

Во втором варианте граничные условия исключительно важны, но они играют как бы корректирующую роль, как это в основном предусмотрено в рамках решения краевых задач математической физики. В этом случае границы следует воспринимать как носителей разнообразных краевых эффектов.

Третий вариант соответствует совсем иному миру, где твердые границы, сближаясь, а иногда смыкаясь и пересекаясь, создают самые замысловатые и причудливые конфигурации сильно разобщенных мелких, но многочисленных скоплений воды и воздуха. Важно и то, что эти конфигурации всегда имеют хорошо организованную закономерную структуру. Здесь ситуацию обостряет некое противоречие: с одной стороны, размеры отдельностей скоплений воды требуют непомерно мелкого шага расчетных интервалов времени и расстояний (от метров до долей миллиметра и от минут до долей секунды), с другой — размеры территорий, для которых необходимо проведение соответствующих оценок и расчетов, остаются несоразмерно огромными (от единиц до нескольких миллионов квадратных километров). В этих условиях практическое (но не принципиальное!) использование уравнений сплошной среды теряет всякий смысл. Ситуация диктует нам требование расстаться с этими уравнениями и использовать другие способы описания процессов и явлений.

Бросим теперь краткий взгляд последовательно на все три сферы со своей специфической гидрологической точки зрения — что можно о них сказать в отношении особенностей поведения присутствующей в них воды.

Атмосфера. Из трех земных сфер она наиболее неустойчива, динамична, изменчива. Находится под воздействием сил тяжести, давления, кориолисовой и молекулярного и турбулентного трения. Воспринимает солнечную энергию напрямую и опосредованно от нагреваемой земной поверхности. Вода в атмосфере присутствует в основном в газообразном состоянии и в виде облаков — скоплений мельчайших капель. Поэтому атмосферная фаза гидро-

логического цикла целиком связана с общей циркуляцией атмосферы и локальными особенностями ее взаимодействия с сушей и океаном, поскольку вода как элемент атмосферы сопровождает все процессы, происходящие в последней.

Трехмерные детерминированные модели погоды, в основе которых лежат упомянутые выше уравнения сплошной среды, исключительно сложны, в первую очередь вследствие некоторых неопределенностей и неполноты своего физического содержания. Динамическая неустойчивость, нелинейные взаимодействия и условности учета граничных условий (влияние подстилающей поверхности) приводят к быстрому расхождению модельной и действительной ситуации. Именно поэтому детерминированный прогноз последовательных состояний атмосферы ограничен несколькими днями (Дж. Шукла, в книге «Долгосрочное и среднесрочное прогнозирование погоды. Проблемы и перспективы». М., 1987). Поскольку зависимость поведения атмосферы от ее начального состояния с течением времени стремительно затухает, то к ней приходится относиться как к стохастической или детерминированно-хаотической системе. Другими словами, неограниченная во времени *модель погоды с неизбежностью может быть только стохастической*, но с учетом детерминированной периодичности — суточной и годичной.

Гидросфера. Вода здесь уже не является агентом в другой среде, а собственно и составляет сферу как таковую. По сравнению с воздухом она обладает не только значительно более высокой плотностью, но и может считаться и несжимаемой жидкостью, что упрощает некоторые математические выражения. Действующие силы и уравнения здесь почти те же самые, что и для атмосферы, но дополнительно должно быть учтено все многообразие влияния последней на динамику океана. В идеале детерминированная модель гидросферы должна охватывать весь Мировой океан. Но этот идеал немедленно вступает в противоречие с желаемой степенью пространственного и временного разрешения. Вообще же существуют две противоречивые тенденции — стремление математически описать океан в целом и одновременно увеличить степень разрешения, чтобы «ухватить» многие важные, но ускользающие детали процессов. А за «разрезание» единого объекта моделирования всегда приходится дорого расплачиваться, но чаще всего — это непоправимое зло.

Тем не менее широко распространены попытки моделирования динамики отдельных локальных участков Мирового океана, в частности окраинных морей. В результате помимо таких «жестких» естественных границ, как дно и береговая линия, вводятся условные «жидкие границы», на которых обмен массой и энергией с окружающими водами организуется в виде «граничных входов и выходов» (Жак Ниуль. Анализ морских систем. М., 1978) и которые

являются постоянными источниками расчетных неприятностей. Положение океанологов особенно осложнено на мелководье и вблизи берегов. Заливы и проливы, острова и полуострова, мысы и речные устья, выбрасывающие в океан массы пресной воды, — все это сильно омрачает чистоту помыслов ортодоксальных океанологов как владельцев рафинированной системы уравнений открытого моря. А приливы и отливы, а ветровые сгоны и нагоны, а области взаимодействия речных и морских вод — дельты и эстуарии?

Здесь суша диктует свои условия и наводит определенный детерминированный фон.

Литосфера. Для наших целей более актуально обратить внимание на континентальную земную кору — верхнюю часть суши, сложенную твердыми горными породами со средней плотностью 2 700—2 800 кг/м^3. Конечно, в земной коре происходят движения и дислокации, но твердое тело есть твердое тело. И динамика воды, находящейся на суше и потерявшей гидравлическую связь с гидросферой, уже далеко не столь стохастична. Более того, путь любой водной частицы из любой точки поверхности суши почти точно предопределен, даже если наблюдателю он известен не во всех деталях или неизвестен вообще. Эта водная частица может передвигаться как угодно — по вертикали или наклонно, и где угодно — по поверхности или в толще почвы и горной породы. Она может перемещаться в речных руслах, и тогда место ее попадания в океан четко определено. Действительно, стохастическая или хаотическая динамика в текущей реке не способна увести поток воды никуда, кроме устья. Водосборы, водоразделы, поверхностная и подземная гидрографическая сеть — вот основные средства природной тверди, регламентирующие движение воды в наземной части гидрологического цикла. В конечном счете, мы отчетливо видим, что движение и вообще поведение воды в пределах суши практически детерминировано. Поэтому развитие именно *детерминированных моделей формирования стока в гидрологии суши не только оправданно, но и неизбежно.*

Что касается системы гидродинамических уравнений, столь успешно применяемых в метеорологии и океанологии, то, переходя в мир, где ситуацию полностью контролируют самые замысловатые и часто просто неизвестные граничные условия, ее применение для описания гидрологических процессов нельзя признать обоснованным и целесообразным. Однако в литературе можно найти примеры, ориентирующие как раз на обратное (А. С. Монин. Введение в теорию климата. Л., 1982). Методы океанологии в гидрологии суши находят применение в моделировании динамики водных масс в озерах и водохранилищах, а иногда и на отдельных участках крупных рек.

Возвращаясь к описанным выше трем вариантам роли граничных условий и соответствующих им характерных объектов, следу-

ет отметить, что первый и второй варианты относятся к компетенции метеорологии и океанологии, а второй и третий — гидрологии суши.

7.3. Наблюдения и эксперименты в гидрологии

7.3.1. Общие положения

«Эксперимент — вот тот огненный столп, что один может привести в землю обетованную, и те, кто теряет его из виду, обречены блуждать в непроглядной тьме воображения...» (Лорд Болингброк. Письма об изучении и пользе истории. М., 1978).

«Опыт — единственный источник истины: только опыт может научить нас чему-то новому, только он может вооружить нас достоверностью» (Анри Пуанкаре. О науке. М., 1983).

«Принцип науки, почти что ее определение, состоит в следующем: пробный камень всех наших знаний — это опыт. Опыт, эксперимент — это единственный судья научной «истины» (Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Т. 1. М., 1965).

Мы думаем, что этих трех восклицаний вполне достаточно для того, чтобы мы как следует задумались над вопросом: а как обстоят дела с экспериментами в гидрологии? И существует ли вообще экспериментальная гидрология? Сразу ответим: несомненно, существует, хотя бы потому, что существуем мы, гидрологи. Но, вопреки всем законам логики, — это самая слаборазвитая отрасль гидрологии.

7.3.2. Пять разделов экспериментальной гидрологии

Основной недостаток экспериментальной гидрологии — частое проведение экспериментов и наблюдений в отрыве от теории стока и его математического моделирования (смысл эксперимента — в самом эксперименте). На этот недостаток можно взглянуть и с другой стороны — попытки накапливать данные впрок никогда не приводили к успеху.

Попытаемся сформулировать главное условие эффективности экспериментальной гидрологии. Это — обязательное сочетание теории, наблюдения, эксперимента, моделирования. Это — непрерывная прямая и обратная взаимосвязь между ними. Игнорирование любого из четырех названных элементов ведет в тупик! Именно в таком идеологическом тупике в настоящее время и пре-

бывают как экспериментальная гидрология, так и связанная с ней теоретическая гидрология.

Хотя все и используют понятие «экспериментальная гидрология», сами гидрологи больше наблюдают, чем экспериментируют. Приведем свою версию структуры экспериментальной гидрологии. Полезно обсудить пять ключевых элементов этой структуры.

Визуальные наблюдения. Они необычайно важны, хотя об этом и не принято говорить, особенно тогда, когда проводятся теми же людьми, которые будут математически моделировать увиденное. Созерцание развертывания процессов гидрологического цикла постепенно формирует представление об изучаемых явлениях. Например, многие гидрологи пытаются описать с помощью различных вариантов дифференциальных уравнений сохранения массы и импульса некое сплошное или струйчатое стекание воды по склонам. Какие визуальные наблюдения положены в основу такой акции? Может быть, стекание воды по асфальту? На самом деле поверхность бассейна представляет собой систему стоковых элементов — ограниченных микроводоразделами участков водосбора, обращенных своей открытой «водосливной» частью к склоновой ручейковой сети. Для стоковых элементов отток из них нелинейно связан с объемом воды, аккумулированной его емкостью. Математическое описание процесса стекания принимает совершенно иной характер. Стоковые элементы легко наблюдаются в природе, но еще почти не являлись объектом экспериментальных исследований.

Стандартные наблюдения на специфических объектах. Это, видимо, самый распространенный вид экспериментальных гидрологических исследований. В качестве специфических объектов могут выступать площадки, лизиметры и особенно малые водосборы, иногда репрезентативные, иногда с экзотическими ландшафтами, иногда находящиеся в специально измененном состоянии (например, с уничтоженной растительностью).

Специальные исследования. Они расшифровывают некоторые принципиальные аспекты гидрологических процессов. В этом случае очень важно соблюдать определенную последовательность действий:

1) установить необходимость постановки вопроса;

2) четко сформулировать вопрос во взаимосвязи с его отображением в модели;

3) спланировать и провести наблюдения и (или) эксперимент, дающие ответ на вопрос;

4) интерпретировать результаты наблюдений и (или) эксперимента, обратив особое внимание на непротиворечивость с другими известными фактами и предполагаемой аналитической аппроксимацией;

5) сформулировать ответ на поставленный вопрос и уточнить, подтвердить, опровергнуть или изменить теорию и математическую модель процесса.

Приведем для примера несколько вопросов, которые можно решить с помощью специальных исследований: 1. Как влияет уклон на скорость добегания, на испарение, на теплообмен, на интенсивность эрозии? 2. Как интерпретировать результаты исследований изотопного состава вод в различных фазах водного режима реки? 3. Какова доля участия различных слоев почвы в суммарном испарении? 4. Становится ли тающий снег «суше» или «мокрее» в результате испарения?

Лабораторные эксперименты. Традиционные лабораторные эксперименты чаще всего относятся к области русловых процессов, а также гидро- и теплофизики. Многие физические свойства почвы, выступающие в качестве параметров модели, определяются лабораторным путем.

В качестве примеров задач более специального типа, необходимых для теории и математического моделирования и решаемых в лаборатории, можно назвать следующие:

1) установление зависимости максимальной водоудерживающей способности или коэффициента фильтрации от льдистости почвы;

2) выявление зависимости коэффициента теплопроводности почвы от ее состава, пористости, влажности и фазового состояния;

3) выявление закономерностей взаимодействия «твердой» и «жидкой» воды в снежном покрове;

4) исследование температурных и прочих достаточно редких условий формирования стока во время ливней в приповерхностном слое снежного покрова в камере искусственного климата.

Полевые эксперименты. При расчетах поверхностного стока широко распространена идея использования кривых инфильтрации для «срезания» эффективных осадков на плювиограмме. Постулированию зависимости скорости инфильтрации от интенсивности дождя и попыткам учесть эту зависимость введением понятий о стадиях инфильтрации и «огибающей инфильтрации» посвящен обзор Ф.Х.Дунина [9]. Данная ситуация — типичное следствие неадекватности условий протекания природного и экспериментального процессов. Схема напорной инфильтрации, приводящая к названным экспериментальным и теоретическим кривым, противоречит картине реального формирования поверхностного стока. В центре внимания здесь должна находиться зависимость интенсивности инфильтрации от интенсивности дождя, причем в высшей степени целесообразно использовать эту зависимость непосредственно при искусственном дождевании.

Взаимодействие теории и полевых экспериментов. Размеры стоковых площадок, подвергаемых искусственному дождеванию,

обычно не превышают 1—10 м^2. Если же пойти намного дальше, то мечтой гидролога-экспериментатора можно назвать очень малый водосбор, площадью около 10 тыс. м^2, со сконструированной над ним дождевальной установкой и набором гидрометрических сооружений и разного рода измерителей. Подобный экспериментальный объект, без сомнения, имеет очень высокую стоимость, но это много дешевле и эффективнее варианта бессистемных наблюдений, ориентированных «на всякий случай». На такой установке можно воочию увидеть (и измерить!) гидрологические последствия различных метеорологических сценариев и катастрофических ливней.

В качестве реализованного примера активного гидрологического эксперимента в природе можем назвать искусственное воспроизведение естественных грязекаменных потоков в естественном селевом очаге. Серия таких экспериментов была проведена в 1972—1976 гг. в бассейне р. Чемолган (хребет Заилийского Алатау близ Алма-Аты). Максимальные размеры попусков воды из специально сооруженного в горах водохранилища характеризуются следующими цифрами: 41 000 м^3 и 28 м^3/с, а полученных грязекаменных потоков — 136 000 м^3 и 430 м^3/с. Плотность потока достигала 2 300 кг/м^3.

Проведение подобного эксперимента не только раскрыло глаза на многие стороны формирования этого всегда неожиданного, а поэтому почти ненаблюдаемого природного явления, но и позволило построить математические модели селевых процессов.

Интересно и в чем-то показательно, что через шесть лет после начала этих экспериментов в Государственном гидрологическом институте, многие сотрудники которого присутствовали на них, вышел сборник, посвященный методологическим вопросам гидрологии, где имеются такие строки: «многие гидрологические явления вообще не могут быть воссозданы экспериментально», и среди перечисленных примеров названы и селевые потоки (Р. А. Нежиховский, 1978).

7.3.3. Исследования речных бассейнов

Проблема

Часто название «экспериментальный» приписывают водосборам, где никакие эксперименты по искусственному изменению их состояния не производятся и не планируются. В целях недопущения взаимонепонимания таких случаев следует избегать.

Нет более прямого, конкретного и надежного способа изучения формирования стока, чем анализ разумно организованных исследований и наблюдений в природе. Активизация деятельно-

сти в этом направлении связана с многолетними работами на репрезентативных и экспериментальных водосборах. Репрезентативными принято называть водосборы малых рек, типичные для того или иного гидрологического режима, экспериментальными — только те, где осуществляется какое-нибудь целенаправленное активное вмешательство в их состояние. Полезность работ и наблюдений в репрезентативных бассейнах явилась предметом дискуссии. Критика бассейновых исследований идет по двум направлениям.

Первое касается полноты и качества проводимых наблюдений и обработки данных и может расцениваться как естественное и неизбежное.

Второе направление связано с более принципиальными соображениями. Д. Родда около четверти века назад жаловался на то, что «критики ... бассейновых исследований не верят не только в их успешность, но и в сами результаты» и что в соответствующих публикациях очень редко «делались попытки объяснить, зачем нужны эти исследования» [9]. Несколько позже В. Клемеш в присущей ему манере отметил, что идея организовать сеть экспериментальных, исследовательских и репрезентативных бассейнов появилась на полвека раньше срока и для его коллег такие бассейны явились поистине «данайским даром» («бойся данайцев, дары приносящих») (В. Клемеш. Выступление на церемонии празднования 25-летнего юбилея МГП. Париж, 1989). Предполагалось, что появление новых гидрологических знаний явится прямым автоматическим следствием наблюдений на малых бассейнах. Но ничего подобного не произошло, в частности, вследствие отсутствия руководящей теории. И вот старый и больной вопрос приходится поднимать вновь.

Вряд ли этот вопрос может звучать так — нужны ли бассейновые исследования? Безусловно, нужны. Наблюдения на малых водосборах для любого истинного гидрологи естественны. Он понимает, что здесь заключено очень многое, почти вся гидрология. Но как извлечь и интерпретировать информацию?

Родда также заявлял, что именно «с бассейновыми исследованиями связаны фундаментальные достижения научной гидрологии». Он полагал, что наибольшая трудность возникает при экстраполяции результатов на более крупные бассейны.

Леопольд, и Родда его цитирует, утверждал, что «проблема связана не с самим средством исследования, каковым являются инструментально оборудованные бассейны, а с выбором круга вопросов, для решения которых мы используем это средство» (Leopold L. B. Symposium of Wellington, 1972). Разовьем эту правильную мысль дальше. С нашей точки зрения, сама постановка задачи использования данных наблюдений на репрезентативном водосборе для характеристики гидрологического режима достаточно боль-

шой территории не является корректной и, тем самым, обречена на неудачу. Но о каких результатах собственно идет речь?

Действительно, простой перенос разного рода цифр, зависимостей и соотношений с одного объекта на другие по неопределенным оценкам «одинаковости» характеристик от ландшафтных до климатических просто неправомочен. Вспомним хотя бы ограниченность идеи бассейнов-индикаторов А. В. Огиевского (1947).

Возникает необходимость вооружить гидрологов неким средством. Это средство — работоспособная, универсальная и адекватная природным процессам моделирующая система. Мы полагаем, что, обладая последней, задачу сравнения неких результатов наблюдений на малых водосборах с различными климатическими, рельефными, ландшафтными и прочими условиями — задачу максимальной неопределенности — необходимо заменить гораздо более конкретной и четкой задачей сравнения ряда параметров этой моделирующей системы.

А далее возникают заманчивые возможности проведения разного рода численных экспериментов. Например, такого типа: одна и та же метеорология (возможно и искусственная) трансформируется в гидрографы стока различных (по размеру, форме, рельефу, ландшафтам и др.) бассейнов с разными наборами численных значений одних и тех же параметров моделирующей системы. Ведь для более полноценного восприятия и понимания информация должна быть спрессованной и оптимально организованной.

В конечном счете, мы вновь склонны подтвердить, что наблюдения на репрезентативных водосборах — основа информационной базы научной гидрологии.

Элементарные и репрезентативные водосборы

Основные перспективы изучения формирования стока в природе мы всегда связывали с наблюдениями на элементарных, или близких к ним, водосборах («микроводосборах»). Концепция микроводосбора как объекта исследования была изложена одним из авторов в 1967 г. (Ю. Б. Виноградов. Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана. Л., 1967). Приблизительно в это же время и в этих же целях элементарные водосборы явились предметом обсуждения со стороны многих исследователей. В частности Кинкейд, Осборн и Гарднер под элементарным водосбором (unit-source watershed) подразумевали промежуточный вариант между малыми стоковыми площадками (small plots) и протяженными водосборами (large watersheds). Он определен как естественная дренажная площадь, имеющая относительно однородные почвы и растительный покров, характеризующаяся однородными осадками и имеющая геологические воздействия на поверхностный сток, репрезентатив-

ные по ареалу (D. R. Kincaid, H. B. Osborn, J. L. Gardner. Water Resources Research, 1966). Другое определение дано Амерманом: элементарная площадь (unit-source area) имеет в идеале единый растительный покров, единый тип почвы и является физически однородным во всех других отношениях (C. R. Amerman. Water Resouces Research, 1965). Субботин, излагая основы ландшафтно-гидрологического принципа изучения стока, писал о необходимости организации работ на небольших элементарных водосборах, в пределах которых «характер гидрометеорологических процессов репрезентативен для одного из основных элементов географического ландшафта данного района» (А. И. Субботин, 1967).

Элементарный водосбор — естественное образование, самой природой «приспособленное» для изучения процессов формирования стока. Результаты наблюдений на таких объектах могут быть использованы с наибольшей эффективностью для научного гидрологического анализа. В качестве репрезентативных естественнее всего использовать элементарные водосборы или небольшую группу последних, составляющих малый бассейн более высокого порядка, чем единичный. Оптимальные размеры репрезентативных бассейнов, несколько зависящие от характера рельефа, составляют 0,01—1,00 км^2. В исключительных случаях эти границы могут быть изменены, но не более чем на порядок, в ту или иную сторону. Согласиться с верхней границей, указанной в соответствующем международном руководстве (Репрезентативные и экспериментальные бассейны. М., 1971) и составляющей 250 км^2 (и даже более) вряд ли можно, ибо это входит в противоречие с самой идеей использования для современного гидрологического анализа именно элементарных водосборов. Действительно, последние как объекты наблюдений и исследований для решения фундаментальных задач гидрологии имеют целый ряд преимуществ:

- обычно они более или менее однородны по стокоформирующим свойствам, что в конечном счете дает возможность полученные оценки параметров модели приписать определенному ландшафту;
- один осадкомерный пункт, расположенный в пределах элементарного водосбора или рядом с ним, дает необходимую и достаточную метеорологическую информацию;
- температуру и влажность почвы можно достаточно надежно оценивать по данным двух-трех измерительных пунктов;
- сток с элементарного водосбора может быть измерен с высокой точностью;
- искажение режима стока на элементарном водосборе вследствие руслового регулирования минимально;
- они визуально хорошо обозримы.

Поскольку все реальные речные бассейны любого размера состоят из множества элементарных водосборов, то, в принципе,

объектом исследований может явиться любой из них. Тем не менее к водосбору, избираемому в качестве репрезентативного и достойного нашего исследовательского внимания, следует предъявить пять основных требований, которые должны обязательно выполняться:

1) действительная репрезентативность;

2) однородность поверхности;

3) постоянство условий формирования стока;

4) четкая выраженность водораздельной линии (в случае выявления даже незначительных неопределенностей от водосбора следует немедленно отказаться);

5) возможность надежного измерения стока (в месте будущего гидрометрического створа желательно отыскать естественный, хотя бы и небольшой перепад отметок дна).

Остальные показатели (правильность формы, симметричность, удобства подхода) являются желательными.

А теперь сформулируем два «основных закона», которым необходимо неукоснительно следовать при организации и проведении наблюдений и исследований на репрезентативных водосборах.

1. Любые измерительные сооружения и подходы к ним не должны оказывать никакого искажающего влияния на состояние водосбора, на гидрологические процессы на нем и в русле и на естественный режим водотока, дренирующего этот водосбор.

2. Любая не предусмотренная программой эксперимента человеческая деятельность в пределах репрезентативного водосбора и соседних с ним смежных склонов недопустима.

В случае нарушения основных законов все наблюдения и научные выводы по ним признаются несостоятельными.

Насколько хороши наши репрезентативные водосборы?

Поделимся своими размышлениями в результате подробного ознакомления с состоянием репрезентативных (хотя часто называемых экспериментальными) водосборов на Валдае (Валдайская научно-исследовательская гидрологическая лаборатория, затем Валдайский филиал Государственного гидрологического института) в 2002—2005 гг.

Мы были удручены и даже подавлены увиденным, особенно когда подумали о самоотверженном труде многих гидрологов на этих водосборах в течение более чем полувека. И дело не в том, что сами объекты, сооружения на них и средства измерений сейчас находятся в плачевном состоянии. Это печально, но не имеет отношения к экспериментальной гидрологии. Мы имеем в виду решения и действия анонимных (для нас) гидрологов при выборе водосборов и организации на них наблюдений. Эти водосборы, особенно знаменитый и известный нам со студенческой скамьи

лог Усадьевский, предстали пред нами как образцы того, к чему приводит игнорирование почти всех перечисленных выше «законов» и требований.

Лог Усадьевский, по разным источникам, имеет площадь водосбора от 0,36 до 0,44 км^2 (что само по себе симптоматично). Лог всегда числился в качестве полевого (луга и пашни, а в настоящее время одни луга), хотя какая-то часть его площади была занята лесом, частично заболоченным. Водораздел выражен неотчетливо, особенно в верхней лесной части. Большой степени неопределенности он достигает в северо-восточном углу водосбора, по поводу чего время от времени возникали споры о том, куда же направлен сток из так называемого «чужого болота». Была даже сделана бессмысленная попытка отделить эту часть болота от репрезентативного водосбора дамбой, сложенной из подручного болотного же материала.

Место для замыкающего створа выбрано не очень удачно, хотя в 40 м ниже по течению имеется перепад на дне русла высотой 0,5 м, к которому было бы логично приурочить водослив. Возведенные бетонные гидрометрические сооружения с тонкостенными водосливами в русле лога и его притоков, достаточно сильно углубленные и по-своему монументальные, в конце-концов оказали сильное искажающее влияние на гидрологический режим водотока.

Подтопление русла и прирусловых участков территории через несколько лет привело, с одной стороны, к их зарастанию кустарником и болотной растительностью и, с другой — к возникновению подземной дренажной системы, осушающей в межень объемистые верхние бьефы водосливных установок. По выражению местных гидрологов, этот феномен звучит так: «вода ушла». Несколько лет назад вблизи водослива были пробурены 10-метровые скважины, которые, в нарушении всяких правил, достигли глубины, на 7—8 м превышающей минимальную отметку дна в замыкающем створе, и тем самым водоносных горизонтов, на самом деле логом не дренируемых. Ближайшая к створу скважина стала фонтанировать и обеспечила через водослив «меженный сток».

В заключение следует сделать вывод, что главный «экспериментальный» лог Валдая выбран и «задействован» крайне неудачно. По большому счету он подлежит закрытию. Хотим надеяться, что материалы наблюдений на логу Усадьевском за отдельные группы лет все же смогут принести пользу гидрологии.

Лог Синяя Гнилка, расположенный недалеко от лога Усадьевского, в свое время был принят в качестве репрезентативного для изучения стока с пашни (97 % общей площади в 0,014 км^2). В 1967 г. там были высажены саженцы ели и сосны, и лог, таким образом, с этого момента мог бы обоснованно считаться экспериментальным. Учитывая, что в настоящее время бассейн лога целиком

занят лесом, преимущественно еловым (35-летнего возраста), можно было бы считать этот эксперимент уникальным. Однако столь же мощное, как и на логу Усадьевском, бетонное водосливное сооружение привело к еще более серьезным негативным последствиям в отношении искажения режима стока из-за малости площади водосбора. С выраженностью водораздела здесь дело обстоит тоже неважно.

Лог Таежный площадью 0,45 км^2 и на 98 % покрытый лесом, в основном еловым, имеет следующие недостатки:

- как и на других логах существуют проблемы с водоразделом, в частности на правом притоке лога Еловый в качестве водораздельной линии создан «искусственный валик» (В. А. Урываев. Экспериментальные гидрологические наблюдения на Валдае. Л, 1953), имеет место также искажение режима стока по тем же причинам, что и на предыдущих логах;
- появление несколько лет назад в пределах водосбора размытой грунтовой дороги, на которой во время снеготаяния и сильных дождей формируется активный поверхностный сток, столь чуждый «таежному» ландшафту.

К сказанному можем добавить, что на всех логах не заботились о каких-либо способах гашения скоростей подхода водных потоков к водосливным отверстиям.

Из негативного опыта работ на репрезентативных водосборах Валдая можно сделать следующие полезные выводы.

1. Сооружение массивных гидрометрических сооружений на репрезентативных и вообще на малых водосборах противопоказано.

2. Каждая гидрометрическая установка (металл, пластик) должна быть деликатно сопряжена с естественным руслом, желательно на естественном перепаде. Она должна содержать в себе индивидуально спроектированный соизмеримый с формой и размерами русла приемный отсек, затем отсек гашения скорости подхода водного потока и собственно верхнего бьефа водослива, имеющего гидравлическую связь с датчиком самописца уровня. Весь этот комплекс ни в коем случае не заглубляется в грунт, а как бы является продолжением русла от места его сочленения с приемным отсеком. Установка в случае необходимости может быть выдвинута вниз по течению за пределы естественного перепада (если его удастся подыскать), причем опоры консольной части установки могут быть и массивными. Водослив, если для этого есть основания, может быть заменен гидрометрическим лотком.

3. Глубина скважин для измерения уровня грунтовых вод не должна превосходить минимальной отметки русла в замыкающем створе репрезентативного водосбора.

4. Еще раз следует подчеркнуть важность четкого определения на местности (если надо, то и инструментального) линий водораздела, лучше всего маркированных.

5. Водный режим репрезентативного водосбора по сравнению с его равновеликими соседями не должен принципиально отличаться, как это, например, имеет место для лога Усадьевского, в отношении меженного стока.

6. Условия репрезентативности и однородности будем полагать по-прежнему важными.

Концепция нестационарных репрезентативных водосборов

Следует отметить возможность и полезность проведения на специально подобранных репрезентативных водосборах кратковременных наблюдений в течение трех-четырех месяцев, желательно в период прохождения дождевых паводков. Такие наблюдения, несмотря на свою отрывочность, позволяют гидрологу составить общее впечатление об условиях формирования стока в новом для него районе, о сопровождающих явлениях и эффектах и, главное, произвести приближенную количественную оценку основных определяющих ситуацию параметров математических моделей и выявить гидрологические особенности данного стокоформирующего комплекса.

Такие нестационарные наблюдения на репрезентативных водосборах полезно использовать при экспрессных методах изучения формирования стока в самых труднодоступных и экзотических уголках мира. Совмещение деятельности служителей экспериментальной гидрологии на стационарных объектах и на объектах, функционирующих только в период экспедиционных исследований, возможно и является тем комплексным средством, которое способно обобщить и систематизировать параметры современных моделирующих гидрологических систем по географическим зонам и ландшафтам земной поверхности.

7.4. Математическое моделирование в гидрологии

7.4.1. Проблема

Моделирование — это исследование реально существующих природных объектов, явлений и процессов, имеющих отношение в нашем случае к кругу проблем, входящих в область интересов гидрологии. Но такое определение на первый взгляд явно недостаточно, ибо все, что делалось и делается в гидрологии, формально удовлетворяет этому определению.

Дополним приведенное определение: моделирование — это способ описания объектов, явлений и процессов, предусматривающий наибольшее приближение к реальной действительности с

учетом всех привходящих обстоятельств. В этом дополнении снова присутствует некоторая неопределенность, но в этом отношении все известные в гидрологии модели тоже ее не лишены. Второе дополнение: моделирование — это не просто наиболее полноценное исследование, но одновременно и процесс конструирования конкретной модели, ее реализации и использования на столь же конкретных объектах.

Теперь неизбежно следует дать определение самому понятию «модель». Итак, модель — отображенная реальность. Модель — нечто, соответствующее оригиналу. Модель — схематическое упрощенное представление о природном оригинале, это соответствующим образом организованное знание.

Можно говорить о различных неизбежных последовательных стадиях самого процесса моделирования:

• создание мысленной (или умозрительной) модели как итога размышлений, рассуждений, мысленных экспериментов, обдумывания поставленной задачи;

• создание вербальной модели как развития предыдущей уже в словесном варианте — в беседах, спорах и обсуждениях, а также в письменных записях всякого рода;

• разработка содержательной модели — это развитие двух предыдущих стадий, но уже с четкими идеологией и методологией, а также с необходимой формализацией.

Содержательная модель — необходимый и самый ответственный элемент всего подготовительного периода. Это реализованное обретение достаточно четкого представления об объекте моделирования, это воплощение принятых решений и осознание особенностей, которые привносит личность «человека моделирующего». Важно подчеркнуть, что качество, оригинальность и разработанность содержательной модели являются в конце концов главными определяющими факторами качества проектируемой модели и успеха всего проводимого исследования. Содержательную модель желательно по возможности упростить, но не принося в жертву принципиально важные стороны исследуемого. Чувство меры и способность испытывать восхищение перед тайнами природы — непреложные свойства удачливого исследователя-модельера.

В зависимости от поставленной задачи и ее особенностей, а также от своих склонностей и возможностей обладатель содержательной модели может ее использовать в четырех возможных неравноценных вариантах:

1. При моделировании в природе in situ (на месте нахождения). Имеется в виду организация наблюдений на конкретных природных объектах в условиях частичного или полного управления ситуацией и возможного воздействия. Такое моделирование можно также назвать экспериментом в природе.

2. При вещественном моделировании (иногда его называют физическим) объект, явление или процесс воспроизводятся в лабораторных условиях в уменьшенном масштабе. Данный подход предпочтителен, когда имеются затруднения со сложностями математических решений. Трудно решаемой проблемой такого моделирования является обеспечение подобия природных и модельных аналогов.

3. При графическом моделировании, которое возможно и в цифровом варианте, что предпочтительно. Имеется в виду создание графических иллюстрационных схем, используемых в образовательных и иных целях, а также разного рода картографические (геоинформационные) построения. В основе картографического или геоинформационного моделирования лежит старинная сентенция: «глобус — модель земного шара».

4. При математическом моделировании, когда содержательная модель переводится на формальный математический язык с дальнейшим построением соответствующей алгоритмической системы, решением комплекса возникающих математических задач и интерпретаций получаемых результатов.

В гидрологии в основном используются математические модели и только о них ниже будет идти речь. Однако привлечение других вариантов моделирования при решении некоторых задач гидрологии может оказаться не только полезным, но и крайне желательным. Совместное использование различных методологических средств в необходимых случаях — очень сильное исследовательское оружие.

Итак, математическое моделирование... Но прежде, чем приступить к обсуждению его проблем и возможностей, вернемся к первой фразе данного раздела: моделирование — это исследование... Мы понимаем разочарование неофитов, которым чудится, что за словами «математическое моделирование» кроется некая гидрологическая тайна, доступная только узкому кругу посвященных. На самом деле современная прикладная математика, получившая в известном смысле почти полную свободу действия, дарованную ей появлением компьютера, практически стала наукой о математическом моделировании. Поэтому исследование гидрологических объектов, явлений и процессов по-настоящему эффективно только в рамках методологии математического моделирования. Другими словами, при их количественном описании понятия «исследование» и «моделирование» выступают в качестве почти синонимов.

Для сведения заметим, что в 50—60-е годы XX в. математическое моделирование поддерживалось параллельно аналоговыми и цифровыми вычислительными системами. При аналоговом моделировании использовалась та возможность, что функционирование специально сконструированных электронных схем описыва-

лось теми же дифференциальными уравнениями, что и некоторые гидрологические явления. В конце концов, более универсальный и жизненный вариант полностью возобладал.

Математическая модель и математическое моделирование — понятия, настолько расширившие свое местоположение в современной науке, что поменяли свою некогда чисто методологическую сущность на почти мировоззрение. Действительно, применение математики для описания природы основано на использовании математических моделей, а современная математическая физика — это теория математических моделей физических явлений. Поэтому приложение методов математики к естественным наукам, и гидрологии в частности, построено исключительно на математическом моделировании.

Математическая модель — приближенное описание природных явлений и процессов, выраженное при помощи математических правил и математической символики.

Математическое моделирование — способ исследования объектов, явлений и процессов, основанный на применении математических моделей.

Если какое-то время назад в гидрологии как бы противопоставлялись два взаимодополняющих подхода — традиционный и математического моделирования, то сейчас можно однозначно утверждать, что математические модели — это основной, если не единственный инструмент любых гидрологических исследований. Сказанное вовсе не означает, что традиционные методы гидрологии канули в вечность, ибо еще функционирует достаточное количество ортодоксальных гидрологов, носителей этой научной парадигмы. Всем же истинным достижениям традиционной гидрологии всегда найдется подобающее им место в современной «моделирующей гидрологии».

Можно ли утверждать, что математическое моделирование обеспечило сегодня необходимый научный уровень и результативность гидрологии? К сожалению, нельзя. Констатируемый многими мыслящими гидрологами кризис современной гидрологии обусловлен именно проблемами и тупиками математического моделирования.

7.4.2. Противоречивость понятия «математическая модель»

В качестве основы для создания методов гидрологических расчетов и прогнозов нового поколения должно служить математическое моделирование. Необходимо всегда помнить, что использование математики — не самоцель. Для того чтобы успешно моделировать, следует очень хорошо знать объект моделирования — процессы формирования стока. Таким образом, проблема упира-

ется в методологические аспекты моделирования, так как моделировать одно и то же явление можно по-разному.

Словосочетание «математическая модель» перед гидрологическим истеблишментом как бы уравнивает всех специалистов по моделированию. Хотя среди последних присутствуют и специалисты своего дела, и люди, злоупотребившие доверием простаков, но хорошо знающие необходимый набор «ключевых слов». Известно слишком много примеров математических манипуляций в гидрологии без пользы для науки. Столь же опасен антиматематический фанатизм гидрологов — приверженцев ортодоксальных взглядов. Выход — широкое и уверенное использование математики и одновременно освобождение от ее «гипноза». Освоение гидрологами математических методов позволит им увидеть во многих моделях отсутствие большого смысла с точки зрения гидрологии, что будет способствовать пресечению отдельных псевдонаучных тенденций.

Существует еще один важный аспект: за словом «модель» может стоять и одно единственное уравнение, и сложнейшая система, подробное описание алгоритмов которой может занять целую книгу. Ниже везде под понятием «модель» или «моделирующая система» имеется в виду достаточно полноценное математическое описание процессов формирования стока во всем их многообразии, взаимозависимости и сложности.

7.4.3. Два принципиально различных класса математических моделей

Необходимо разделение и осознание существенного содержания моделей двух принципиально различных классов — детерминированных (физических, генетических) и стохастических (вероятностных, статистических).

Детерминированные модели формирования стока обобщают, упорядочивают и «спрессовывают» всю существенную информацию, которой располагает современная теоретическая и экспериментальная гидрология. Главная задача детерминированного моделирования — это преобразование метеорологического воздействия на речной бассейн в гидрограф стока в замыкающем створе.

Стохастические модели описывают системы, основанные на понятиях теории вероятностей и математической статистики — случайных событиях, величинах, функциях (процессах), полях. На применении стохастических моделей построена специфическая ветвь современной гидрологии — «стохастическая гидрология» [12, 22]. В рамках последней анализируются или, наоборот, воспроизводятся разного рода случайные (стохастические, вероятностные, статистические) структуры.

Важное, в некотором роде фундаментальное, свойство стохастических моделей — это их пригодность для описания тем или иным образом организованных числовых массивов, относящихся к любой области человеческого знания.

Таким образом, стохастическая гидрология гидрологична только по происхождению данных.

Часто гидрологи-стохастики и гидрологи-детерминисты используют одно и то же понятие — «гидрологический процесс». Но в одном случае — это последовательная смена состояний в развитии природного явления формирования стока на водосборе, а в другом — временные ряды, т.е. просто наблюденные последовательности некоторых гидрологических величин (расходов, слоев осадков, стока, испарения).

Среди апологетов стохастической гидрологии распространено мнение, что стохастический процесс является более общим и сложным, чем его детерминированный аналог. Но тогда этот детерминированный процесс должен быть крайне примитивным, чтобы рассчитывать на существование своего стохастического «двойника». Если исходить только из этой предпосылки, то существование гидрологии как таковой стало бы бессмысленным.

Часто ставился и продолжает ставиться некорректный вопрос: какая модель предпочтительнее — детерминированная или стохастическая? Эти модели всегда решают разные задачи: для детерминированной, например, характерны вычисления гидрографов стока, для стохастической — анализ или воспроизведение колебаний характеристик стока. Поступить наоборот просто немыслимо.

7.4.4. Детерминированное моделирование

Цели моделирования

Современное математическое моделирование способно решать любые традиционные и многие новые задачи гидрологии. Это и изучение процессов формирования стока с помощью модели, включая разного рода численные эксперименты, и чисто прикладные задачи — получение гидрографов стока с неизученных бассейнов, прогнозная оценка изменений стока под влиянием изменений ландшафтов и климата, оперативный прогноз (кратко- и долгосрочный) при разных фазах режима стока. Модели одновременно позволяют получить информацию об элементах водного баланса (осадки, сток, испарение) и о переменных состояния в различных точках бассейна (запасы воды в снежном покрове, влажность почвы, уровень грунтовых вод). Совместно с геохимическими и экологическими моделями модели формиро-

вания стока создают основу для научного обоснования мероприятий по охране окружающей среды.

Модели сосредоточенные и распределенные

В первую очередь следует различать два принципиально разных подхода к описанию процессов формирования стока в речном бассейне, который рассматривается как объект конкретной реализации общих закономерностей этих процессов и как некая динамическая система. Первый подход напрямую связан с традиционными методами расчетов и прогнозов стока, которые основаны на постулате о восприятии бассейна как однородного единого целого. Он же сохраняется и в так называемых сосредоточенных моделях.

Желание учесть пространственную неоднородность погоды и других определяющих сток факторов, т.е. второй подход, приводит к распределенным моделям. Распределенность здесь распространяется на вход, параметры, переменные состояния и большинство других переменных.

Существует определение, претендующее на некоторую фундаментальность, различия сосредоточенных и распределенных моделей: первые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, вторые — дифференциальными уравнениями с частными производными. Такое формальное и в общем случае неверное определение порождает некоторое недоумение, так как есть много и других способов описания моделей, уравнения с частными производными с успехом могут быть заменены системами обыкновенных дифференциальных уравнений, в алгоритмах модели естественно присутствие аппроксимаций и решений в виде конечных (алгебраических и трансцендентных) уравнений. И вообще, необходимо различать обоснование алгоритмов модели и сами алгоритмы.

Для сложных природных процессов важен сам принцип распределенности, который может быть реализован самыми различными средствами.

Современная математическая модель формирования стока, безусловно, должна быть распределенной. Только в этом случае выявляется реальная возможность учесть все многообразие природных ситуаций в пределах речных бассейнов, особенно больших и очень больших.

Некоторые обычно выделяемые типы моделей

Терминология, связанная с математическим моделированием, противоречива, не всегда однозначна и не является общепринятой. Более того, некоторые понятия за последние годы претерпе-

ли значительные изменения, поэтому все время приходится различать употребляемые термины и термины целесообразные.

Существует мнение, что описание процессов формирования стока следует рассматривать как задачу математической физики. А некоторые, особо выделяемые по ряду признаков, модели называть физико-математическими. Это отнюдь не простой и не безобидный вопрос, он упирается в сущность различия между физикой и науками о Земле.

Физика изучает простейшие и наиболее общие закономерности явлений природы. Она рассматривает элементарные процессы и явления, т.е. основные, очищенные от множества сопутствующих деталей, рафинированные, выделенные из сложных природных процессов и явлений. Физика содержит относительно небольшое число фундаментальных теорий, которые являются квинтэссенцией знаний о характере физических процессов и явлений.

Гидрология, так же как и другие науки о Земле, руководствуется законами физики, но, сталкиваясь с исключительной многофакторностью и взаимозависимостью явлений, вынуждена находить более простые решения и аппроксимации выявляемых зависимостей. Исторически, более ранним и очевидным примером может служить параллельное возникновение и существование двух, в общем-то, очень близких друг другу наук, как гидромеханика (раздел физики) и гидравлика. Последняя, в отличие от гидромеханики, основана на более приближенных зависимостях, чаще всего в одномерном разрешении, и широко использует эмпирические и полуэмпирические подходы. Недаром те модели формирования стока, которые выдвигались в качестве физико-математических, в конечном счете, при попытках более или менее широкого их использования, приводили к возрастающей лавине проблем. Не следует пренебрегать примерами истории науки.

Очень известный термин «концептуальная модель» возник в связи с необходимостью учесть, в противовес моделям типа «черного ящика», имеющиеся физические представления о формировании стока. Отмечены недостатки концептуальных моделей, такие как необходимость калибровки (идентификации) параметров и ориентация на конкретный водосбор. Необходимость избавления от этих недостатков привела к появлению понятия «физически обоснованных» моделей. Степень физической обоснованности — понятие достаточно неопределенное, тем более что при работе с физически обоснованными моделями использование калибровки параметров практически сохранилось.

Дальнейший ход событий привел к попарному объединению терминов, в результате чего появились понятия «сосредоточенные концептуальные модели» и «распределенные физически обоснованные модели». Для моделей же, предназначенных не для отдельных конкретных бассейнов, а практически для любых без из-

менения алгоритмов и компьютерных программ, предлагается термин «моделирующая система».

Видимо подчеркивание концептуальности или физической обоснованности, а также применимости модели для различных бассейнов, вряд ли целесообразно. Все это не может не присутствовать в любой современной модели формирования стока.

Система моделей или единая универсальная модель?

Что предпочтительней — система моделей, различающихся по виду стока (талый, дождевой, подземный) и региональными особенностями, или же единая обобщенная универсальная модель? В гидрологическом научном сообществе известны сторонники обоих направлений. Гораздо более сложной, но и более перспективной задачей является создание и использование единой модели, объединяющей в себе все виды стока, пригодной для речных бассейнов любых размеров и для любой природной зоны и учитывающей все региональные особенности параметрически.

Преимущества такого подхода для сторонников конкурирующего направления немедленно станут очевидными, когда им потребуется «склеить» свои модели для их совместного использования. Идея сборки подходящей модели из различных сочетаний заготовленных впрок элементов (модулей) представляется не только трудно осуществимой, но в случае их насильственного объединения даже чреватой последствиями. Любой специалист может стать в тупик перед задачей: из каких «строительных» блоков следует собрать модель в каждом конкретном случае? Следует ли, например, подключать блок, который для данного бассейна может «заработать» один раз за сто лет? И так во всем. «Правильная» модель должна быть рассчитана не только на обыденные, но и на любые экстремальные события. Истинную повторяемость каких-либо явлений пусть количественно оценит модель, а не человек с его априорными предрассудками. При имитационном моделировании можно выйти даже на ситуацию, которая в данном месте вообще пока не наблюдалась.

Принципы проектирования математических моделей формирования стока

Все перечисленные ниже принципы очень важны, так как только их полный учет может привести к желаемому результату — получению работоспособной моделирующей системы. И, как почти всегда бывает, среди этих принципов есть основной, при нарушении которого об остальных можно уже и не говорить.

Первый и главный принцип: модель должна быть адекватна природе. Казалось бы, что это естественное, даже тривиальное, поло-

жение выполняется всегда или почти всегда. На самом деле это далеко не так. Даже относительная адекватность, не говоря уже о почти полной, встречается поразительно редко. Для более глубокого и адекватного математического описания объектов моделирования необходим тщательный пересмотр наших представлений о системе гидрометеорологических процессов, объединяемых под названием «процессы формирования стока». Опыт моделирования показал, что отсутствует количественная информация о многих сторонах явлений, о которых гидрологи привыкли иметь только качественное и поверхностное представление. Более того, о самом формировании стока и его особенностях в различных физико-географических условиях, о сопутствующих ему процессах мы зачастую имеем искаженные или даже неверные представления. Требуется экспериментальное и теоретическое восполнение пробелов.

Второй принцип: должна быть достигнута максимально допустимая простота всех аппроксимаций и математических описаний. Вообще вопрос о достижении равновесия между простотой и сложностью при проектировании модели представляется очень важным. Блоки модели формирования стока для расчета отдельных частных процессов должны быть значительно проще, чем самостоятельные модели, предназначенные только для их описания. Специалисты по отдельным отраслям гидрологии часто имеют претензии к авторам общих моделей по поводу недостаточной, как им кажется, степени подробности описания изучаемых ими процессов. Это — опасное заблуждение. Совмещение подробнейших моделей частных процессов в единой системе неизбежно приводит к провалу. Другая крайность — чрезмерное упрощение — влечет за собой полную утрату эффективности от применения методологии математического моделирования. Оказывается, что проявить такт и беспристрастность при проектировании модели, сохраняя единство формы и стиля в различных ее частях, настолько сложно, что можно только мечтать о приближении к идеалу.

Третий принцип: первичность гидрологической сущности рассматриваемых явлений и недопустимость диктата со стороны математического аппарата. На первый взгляд такого просто не может быть, но, увы, это случается слишком часто, если не преобладает.

Четвертый принцип: модель должна быть ориентирована на реально имеющуюся метеорологическую информацию.

Пятый принцип: проектирование математической модели должно сопровождаться систематизацией ее параметров. Последние призваны отображать объективные физические характеристики водосборов, поэтому они должны присутствовать в любых моделях формирования стока. Более того, без большинства этих параметров модели нельзя считать физически обоснованными. Исклю-

чительно важна сама возможность априорного задания параметров, которые имеют конкретный физический смысл и для оценки которых созданы лабораторные и полевые методы, а также способы измерений и вычислений. Итак, параметры модели должны быть обобщены и нормированы, составив определенный раздел базы данных для моделирования стока.

Шестой принцип: должно быть подготовлено руководство по использованию данной моделирующей системы. Это должно не только помочь возможному пользователю, но и оказать определенное дисциплинирующее воздействие на разработчиков.

Создание сложной моделирующей системы

Прежде чем приступить к созданию современной гидрологической моделирующей системы, необходимо:

- разобраться в причинах, которые побуждают вас приступить к созданию новой модели;
- ответить на вопрос — чем вас не устраивают ранее созданные модели?
- оценить — какими идеями и возможностями вы располагаете, чтобы достичь принципиально новых и лучших результатов;
- наметить пути преодоления (или осознанного игнорирования?) сопротивления людей, по разным причинам непосредственно заинтересованных в противодействии изменениям существующего положения в гидрологии.

Процесс создания модели очень условно включает в себя несколько основных этапов.

1. *Подготовительный этап.* Любые рекомендации условны и неопределенны. Необходимо освободиться от шаблонных или предвзятых воззрений. Полезны беседы как с единомышленниками, так и с противниками ваших взглядов. Необходимо ознакомление со всем, что имеет отношение к данной проблеме (для не гидрологов — это вся гидрология и многое другое).

2. *Этап проектирования содержательной модели.* Формулирование принципов и концепций. Создается принципиальная концептуальная схема. Задача разделяется на подзадачи. Осознаются все вопросы научной идеологии. Проводится наброска некоторых решений. Осуществляется поиск наиболее удачных аппроксимаций. Этот этап — время высокого творчества, вдохновения и озарений, время совершения возможных ошибок, проявления узости мышления и подверженности общепринятым заблуждениям.

3. *Этап конструирования математической модели.* Создание системы алгоритмов. Составление компьютерных программ и их отладка.

4. *Этап авторского исследования работоспособности полученной модели.* Испытание модели в предельных и утрированных условиях.

Реализация модели на примере конкретных речных бассейнов, находящихся в различных природных зонах. Проведение разного рода численных экспериментов.

5. *Этап непосредственного моделирования процессов стока.* Это исследовательская (или прикладная) деятельность, ради которой и создавалась модель. Время использования модели может быть растянутым и прерывистым. Задачи моделирования могут быть уже самыми различными. Постепенно накапливаются опыт моделирования и материалы его результатов.

6. *Этап интерпретации результатов моделирования.* Это время выводов, обобщений, систематизаций. Возможен вывод о желательности модернизации модели.

При серьезной постановке решения проблемы неизбежно последовательное появление нескольких версий модели. Тогда последовательность выделенных этапов должна повторяться вновь и вновь, возможно с другими соотношениями затрат интеллектуальной энергии за отдельные этапы.

Принципиально различные модели речного бассейна

Каждой модели формирования стока соответствует своя модель речного бассейна. Последний представляет собой систему элементарных водосборов — поверхностных и подземных различных ярусов. Элементарным может быть назван водосбор с одним неразветвленным тальвегом у подножия обращенных к нему склонов, которые, в свою очередь, могут быть названы элементарными.

Способ описания процесса движения воды в речном бассейне обычно определяет и структуру математической модели формирования стока в целом. Задача расчета стекания воды в пределах бассейна для расчета гидрографа стока связана с необходимостью «переноса» текущих интенсивностей стокообразования в узлах пространственной расчетной сетки в замыкающий створ. Пространственное интегрирование этих интенсивностей с учетом соответствующего сдвига во времени, обусловленного добеганием стекающей воды, и ведет к получению гидрографа стока.

Существует два принципиально различных подхода для решения этой задачи.

Подход 1. Основное его содержание — это непосредственный пространственно-временной последовательный расчет движения воды в пределах бассейна.

Как описывать процесс движения воды для реальных речных бассейнов — малых, средних и больших? Вот альтернативные варианты:

1) вести расчет для всех элементарных склонов бассейна;

2) делать это выборочно только для отдельных, соответствующим образом отобранных элементарных склонов;

3) игнорировать существование элементарных склонов и вести расчет для укрупненных площадей.

Какому из этих вариантов должно быть отдано предпочтение? Первый представляется утопическим, поскольку количество элементарных склонов в реальных бассейнах чрезмерно велико: на площади 1 000 км^2 их обычно насчитывается в зависимости от природной зоны от 1 до 5 тысяч. Третий вариант, казалось бы самый неразумный, используется чаще всего. Замена большого множества элементарных склонов малым множеством расчетных плоскостей сопровождается определенными информационными потерями. Главная из них — это сильное занижение уклонов и многократное преувеличение длины склонов. Последствия такой акции гидрологу очевидны.

Таким образом, вопрос упирается в соответствие структуры поверхности бассейна в природе и в модельном мире. Модельная структура обычно подчинена двум основным требованиям: отобразить хотя бы в основном индивидуальные особенности бассейна и, главное, определить пути и условия стекания воды, вводя желательные упрощения.

Практика моделирования процессов стока содержит не так уж много вариантов аппроксимации поверхности бассейна. Обычно это набор плоскостей квадратной или прямоугольной формы, соответствующим образом ориентированных в пространстве. Чаще всего при этом используется равномерная прямоугольная сетка, а речная сеть и водоразделы представляются отрезками прямых линий, параллельных осям координат. Рассматривались и некоторые криволинейные поверхности. Для ряда гидрологов более привлекательна разбивка площади бассейна на конечные элементы с учетом топографии, ландшафтной структуры и конфигурации гидрографической сети.

Итак, основное содержание данного подхода — это чаще всего численное решение дифференциальных уравнений движения и неразрывности — двухмерных и одномерных — для всех без исключения элементов пространственной дискретизации бассейна.

Подход 2. Основная идея этого подхода — постулирование того факта, что некоторая упорядоченная система точек, расположенных в пределах водораздельного контура бассейна, объективно способна представлять этот бассейн. Поэтому эти точки могут быть названы «репрезентативными». В конечном счете, стоковые переменные могут быть вычислены для каждой из репрезентативных точек, а затем с необходимым временным сдвигом (время добегания) просуммированы для бассейна в целом. Вариантов упорядоченности репрезентативных точек не так уж много.

В гидрологическом моделировании практически монопольно присутствует равномерная прямоугольная сетка. Более подходящей является гексагональная, обладающая тем свойством, что

каждая точка удалена от шести соседних на одинаковые расстояния. Точки, отвечающие этому условию, возникают при пересечении под углом 60° двух систем параллельных линий. Если все соседние точки соединить прямыми линиями, то возникают правильные шестиугольники, каждый из которых состоит из шести равносторонних треугольников. Из геометрии известно положение, что из равных выпуклых многоугольников с числом сторон больше шести уже нельзя составить мозаики (мозаика — множество многоугольников, целиком и без накладок покрывающих плоскость).

Каждой репрезентативной точке (РТ) соответствует определенная «подкомандная» площадь (РТ-площадь). РТ характеризуется координатами, высотой над уровнем моря, ориентацией, уклоном и в принципе может быть отождествлена с «точкой» на местности. Подход 2 по сравнению с подходом 1 обладает поразительной простотой.

Содержание моделей формирования стока

Гидрологическое содержание моделей диктуется самой природой. Другими словами, весь комплекс процессов формирования стока имеет свои аналоги в моделирующей системе — блоки отдельных частных процессов. Последние перечислены ниже.

1. Выпадение дождя или снега.
2. Обмен поверхности бассейна и атмосферы тепловой энергией.
3. Перехват осадков растительным покровом.
4. Формирование, изменение, таяние и исчезновение снежного покрова. Водоотдача из снега.
5. Начальные потери стока, инфильтрация и формирование поверхностного стока.
6. Задержание части поверхностного стока в бессточных отрицательных формах микрорельефа склонов.
7. Динамика воды на поверхности склонов.
8. Динамика почвенных вод (явления в ненасыщенной зоне). Фазовые переходы воды в почве. Формирование почвенного стока.
9. Испарение.
10. Динамика подземных вод различных ярусов (явления в насыщенной зоне). Формирование подземного стока.
11. Динамика воды в русловой сети речного бассейна.
12. Сток в замыкающем створе.

Для распределенных систем моделирование этих процессов ведется в каждом узле пространственной сетки или в каждой репрезентативной точке отдельно. Эти вычисления организуются в первой системе блоков. Вторая система содержит разного рода суммирования, осреднения и другие операции, объединяющие ре-

зультаты моделирования первой системы в единое целое. В рамках третьей системы подводятся итоги моделирования и организуется цифровая и графическая выходная информация.

Итак, перечень моделируемых процессов для различных моделей приблизительно один и тот же. Понимание авторами моделей протекания процессов формирования стока уже далеко не однозначно. И, наконец, аппроксимации количественных закономерностей и организация структуры моделей могут различаться чрезвычайно [6, 13, 14].

Каждую модель в какой-то степени характеризует количество и перечень величин разного рода, наполняющих ее алгоритмы. Некоторые величины следует выделить и классифицировать следующим образом:

1. Константы (например, солнечная постоянная или плотность, удельная теплоемкость, коэффициенты теплопроводности, удельная тепловая энергия фазовых переходов воды и льда).

2. Условные константы — константы, принятые таковыми только в рамках конкретных моделей.

3. Характеристики бассейнов или отдельных их элементов и «точек» (например, координаты, площади, длины, глубины, уклоны, ориентации, высоты над уровнем моря).

4. Параметры — определенные числовые коэффициенты в алгоритмических системах моделей, постоянные для каждого объекта, но изменяющиеся от бассейна к бассейну в зависимости от их особенностей.

5. Переменные состояния — величины, значения которых в каждый данный момент времени характеризуют состояние бассейна или его отдельных элементов (например, количество воды или льда на поверхности бассейна, в почве, в подземных водах, в русловой сети или температура снега, почвы, воды). Задаваемые при моделировании начальные условия определяются значениями именно переменных состояний.

Режимы моделирования

Универсальные физически обоснованные распределенные моделирующие системы призваны способствовать решению широкого круга гидрологических задач. В принципе при проектировании и конструировании таких систем должна быть предусмотрена возможность их использования в самых различных режимах. Последние могут быть классифицированы следующим образом:

1. *По форме и сущности моделирования*:

• детерминированный (календарный, хронологический) — получение гидрографов стока;

• детерминированно-стохастический (динамико-стохастический) — получение кривых распределения характеристик стока

(годовых, сезонных, месячных, суточных, максимальных, минимальных расходов).

2. *По способу получения входной метеорологической информации*:

• интерполяционный — использование данных наблюдений метеорологических станций;

• стохастический — моделирование метеорологических элементов с помощью стохастической модели погоды;

• произвольный — назначение искусственных, в том числе и нереальных, данных в некоторых специальных целях, способствующих углублению представлений о процессах формирования стока.

3. *По целям моделирования*:

• тестовый — проверка работы модели в условиях упрощенной и утрированной ситуации;

• оптимизационный — оценка параметров модели обратным путем;

• естественный — моделирование в естественных природных условиях;

• сравнительный — естественный режим, расширенный в плане сопоставления смоделированных и наблюденных данных и получения соответствующих критериев качества;

• имитационный — проведение экспериментальных расчетов, чтобы понять поведение бассейна как природной системы, в том числе в предположительно измененных ландшафтных и (или) климатических условиях;

• экспериментальный — проведение численных экспериментов для выявления работоспособности модели в идеализированных, в том числе и нереальных, условиях;

• прогностический — экстраполяция гидрографов стока или получение условных кривых распределения характеристик стока;

• обучающий — использование модели для изучения процессов формирования стока и функционирования модели;

• презентационный — иллюстрация возможностей модели и особенностей ее работы.

В зависимости от поставленной задачи необходимы сочетания различных режимов — по одному из каждого класса.

Основные уравнения динамики воды в бассейне

Почти общепринято, что в рамках физически обоснованных моделей динамика воды в речном бассейне определяется набором уравнений с частными производными, такими как уравнение Сен-Венана или кинематической волны для поверхностного и руслового стекания, уравнение Ричардса для описания движения почвенных вод и Буссинеска — подземных. Однако именно здесь заложены причины многих несоответствий и противоречий в рас-

пределенном моделировании стока. Это свидетельствует о неблагополучии в современных теоретических представлениях о природе гидрологических явлений.

Как уже отмечалось, одно из центральных мест в моделях формирования стока занимают блоки стекания воды в пределах речных бассейнов. Целевая функция таких блоков — дать возможность оценить приток воды в русловую сеть и далее по последней в замыкающий створ. При осмысливании того, как это делается, бросаются в глаза многие противоречия и парадоксы.

Выбор математического аппарата должен соответствовать поставленной задаче — не быть недостаточным, но и не оказаться чрезмерным.

При решении задачи расчета склонового и руслового течения воды, как и почти всегда, возможны два подхода: дифференциальный и интегральный. Для первого требуется гигантское количество информации об уклонах, морфометрии и «шероховатости». Следует отчетливо понимать, что эта информация отсутствует и перспектив ее получения нет. Лучше задать вопрос: необходимо ли получить в результате сложных и длительных вычислений промежуточные сведения в виде полей (двухмерные модели) или полос и линий (одномерные модели) стекания? Этот вопрос следует связать с двумя другими, более частными.

Первый из них: для чего нужны эти поля, полосы и линии? Если только для итоговой оценки суммарного притока в русловую сеть и замыкающий створ, то игра не стоит свеч. Для этого требуется описание процесса с другой степенью подробности. Использование в этом случае интегральных склоновых характеристик вместо дифференциальных является скорее благом, чем недостатком.

Второй вопрос: могут ли полученные в результате расчетов картины стекания быть сопоставлены с реально существующими? Увы, нет... Пространственно-временных наблюдений за стеканием воды даже только по поверхности склонов никто не ведет. Здесь возникает еще одно противоречие: попытки применения, например, двухмерных уравнений движения воды на поверхности водосборов сопровождались использованием расчетных пространственных и временных интервалов, совершенно не приемлемых для описания действительной ситуации на склонах. В самом деле, глубины поверхностных склоновых потоков измеряются в миллиметрах и сантиметрах, поэтому пространственный шаг должен быть лишь на порядок больше.

Примеры же из практики двухмерного моделирования свидетельствуют совсем о другом порядке цифр. Приходится признать, что задача выявления истинных закономерностей стекания воды по естественным поверхностям склонов даже не поставлена. Высокое временное разрешение вычислительных моделей является в

действительности иллюзорным, поскольку процессы малого временного масштаба сглаживаются грубым пространственным разрешением. А какой мощный заслон поставлен для моделирования больших бассейнов!

Таким образом, гидрографы притока к русловой сети и стока в замыкающем створе являются результатом многократного осреднения локальных модельных процессов стекания по склонам и русловой сети, адекватность которых природным ничем не подтверждена. Создается впечатление о крайней нецелесообразности столь дифференцированного описания процессов стекания, поскольку единственным критерием работоспособности модели остается только степень совпадения рассчитанных и наблюденных гидрографов в замыкающем створе.

Важность и одновременно дискуссионность всего сказанного заставляют еще раз сформулировать критическое отношение к сложившейся ситуации в области моделирования склоновой и русловой трансформации стока.

Помимо неполной физической обоснованности моделей стекания их использование заставляет столкнуться с двумя очень неприятными моментами: отсутствием надежной информации об истинных условиях стекания и проведением чрезмерно большого объема вычислений для определения полей скоростей и глубин на склонах; полей, адекватность которых природным водосливам проверить практически невозможно и которые фигурируют в промежуточных расчетах при оценке притока в русло.

Дифференциальные уравнения движения и сохранения массы в том виде, в котором они используются в некоторых моделях стока, обладают достаточной гибкостью и чисто математически выполняют навязанную им задачу — перераспределяют сток во времени. Однако тот факт, что на самом деле описывается не совсем тот процесс, который имеет место в природе, в любой момент может доставить неприятность. Таким образом, детальный дифференцированный расчет склоновых и русловых характеристик стекания, в общем-то фиктивных, является ничем не оправданной перегрузкой моделей.

Существует и другая сторона неудачности сложившегося подхода — неадекватность представлений о характере процессов стекания воды в бассейне. Уравнения движения являются настолько общими, что принципиально могут описать любые, самые экзотические случаи перемещения воды.

Но граничные и прочие условия, налагаемые в соответствии с содержательной моделью, могут и привести к желательным результатам, и превратить все в некий казус.

В гл. 3 описана концепция стоковых элементов. Стоковый элемент — это ограниченный микроводоразделами участок поверхностных и подземных водосборов, обращенный своей открытой

частью, своего рода природным «водосливом», к склоновой нерусловой или подземной дренажной сети.

В принципе, конечно, возможно описать динамику воды на водосборе, состоящем из множества стоковых элементов, с помощью уравнений Навье—Стокса (прямое численное моделирование), но делать это столь же нелепо, как применять их к оценке истечения воды через искусственные водосливы, для которых существуют надежные гидравлические зависимости расходов от уровней.

Во многих «физически обоснованных» моделях для описания динамики почвенных вод (ненасыщенная зона) применяется модифицированное уравнение Ричардса (оно же — уравнение диффузии влаги или влагопроводности) — уравнение (3.17), кратко упоминаемое в подразд. 3.4 при описании динамики почвенных вод. Там уже было отмечено о неполной адекватности этого уравнения физике самого явления. Здесь это рассмотрено подробнее.

Оптимизм, проявляемый при использовании этого уравнения, получаемого с помощью закона Дарси и уравнения неразрывности, столь же распространен, сколь и необоснован. Оно кладется в основу соответствующих блоков многих моделей без обсуждения вопроса по существу. Сама идея провести параллель между влажностью почвы и концентрацией диффундирующего вещества оказалась в некотором отношении ошибочной и принесла больше вреда, чем пользы.

Самым большим парадоксом использования уравнения диффузии почвенной влаги является то, что при расчетах ситуацией управляет уже не столько само уравнение, сколько его коэффициенты $D(\theta)$ и $K(\theta)$, не линейно и очень сильно зависящие от влажности. Диапазону естественной вариации последней отвечает изменение параметра D в 10^4, а параметра K в 10^6—10^7 раз.

Еще хуже обстоит дело с принципиальной недееспособностью этого уравнения для описания поведения почвенной влаги. Сама сущность уравнения диффузии (не говоря уже о физически абсурдном предположении, о бесконечной скорости распространения субстанции, о чем всегда следует помнить) связана с идеей выравнивания концентрации вещества по занимаемому объему. Поведение же воды в почве противоречит этой идее. Вода, содержащаяся в верхнем слое, промоченном до уровня максимальной водоудерживающей способности, не диффундирует вниз в более сухую часть почвенного профиля, несмотря на наличие у границы промачивания очень высокого градиента влажности. Другими словами, в пористой среде, управляемой уравнением диффузии влаги, существование подвешенной влаги невозможно.

Известен также эффект Аллэра: из более сухого через более влажный слой почвы вода поднимается к испаряющей поверхности.

Моделирование динамики подземных вод и подземного притока в реки обычно осуществляется с помощью нелинейного уравнения Буссинеска, имеющего вид (записан одномерный вариант):

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} = K \frac{\partial}{\partial x}\left(H \frac{\partial H}{\partial x} \right),$$

где K, μ — коэффициенты фильтрации и водоотдачи (разность между полной влагоемкостью и максимальной водоудерживающей способностью) рыхлообломочной горной породы; H — уровень грунтовых вод над поверхностью водоупора или пьезометрический напор в случае напорного движения; t — время; x — расстояние.

Обычно стараются иметь дело только с одним водоносным горизонтом, хотя число ярусов подземных вод может быть очень велико, особенно для больших бассейнов. И это стремление понятно, так как истинная структура подземной части речных бассейнов скрыта от глаз людских. В то же время требуется громадная нестандартная информация о количестве и стереометрии водоупорных и водоносных горизонтов, их мощности, истинных уклонах, сопряженности с подземной и внешней русловой сетью, о коэффициентах фильтрации и водоотдачи. И все это для разных участков бассейна. Любой гидролог понимает, что получить подобную информацию, обладающую если не точностью, то хотя бы некоторым сходством с действительностью, можно только по единичным, избранным и не очень большим бассейнам.

Почти полное отсутствие необходимой информации для моделирования процессов подземного стока является страшным ограничением, а физическая обоснованность самого подхода — сплошной иллюзией.

Калибровка и валидация моделей

Существуют некоторые общепринятые представления о последовательности действий в рамках процесса моделирования.

Этап первый — период начальной подготовки:

1) разработка модели;

2) составление, отладка и тестирование соответствующей компьютерной программы;

3) верификация — анализ соответствия программы алгоритмам математической модели.

Этап второй — период реализации:

1) калибровка — оценка обратным путем всех или избранных параметров модели для данного бассейна;

2) валидация (оценка адекватности) — исследование модели с точки зрения ее работоспособности для данного бассейна в соответствии с поставленной задачей.

Имеют место два подхода к построению моделей формирования стока. Первый подход связан с идеей выбора оптимальной структуры модели для каждого конкретного бассейна, второй — с получением универсальной модели, в принципе пригодной для любого бассейна.

В соответствии с этими двумя подходами период начальной подготовки математической модели или повторяется вновь и вновь при модельном «освоении» каждого речного бассейна, или же как бы естественным образом входит в единовременный процесс проектирования универсальной модели и ее компьютерной программы. С течением времени ощущается некоторая переоценка ценностей и смещение мнений в пользу универсальности моделирующей системы с «всеобъемлющими» алгоритмами, программой и интерфейсом. Поэтому дальше речь пойдет исключительно о калибровке и валидации в предположении, что универсальная модель формирования стока уже существует.

Идея калибровки унаследована от раннего периода вхождения методов математического моделирования в гидрологию. Имеется в виду идентификация гидрологических систем — отыскание параметров модели путем обратного решения ее уравнений относительно этих параметров, если известны гидрографы стока и ряды наблюдений за входными переменными. Постановка задачи затем была скорректирована, и стали отыскиваться не точные значения параметров (в общем случае довольно безнадежная затея), а их так называемые «оптимальные» значения. В гидрологии возникло новое понятие — оптимизация параметров математических моделей. Под последним подразумевается оценка параметров путем минимизации некоторого критерия качества (целевой функции), оценивающего близость вычисленного и наблюденного гидрографов.

Первое, чем располагает гидролог в отношении способов оптимальной оценки параметров обратным путем, — это метод «проб и ошибок». Он привлекателен тем, что позволяет гидрологу почувствовать влияние изменений значений каждого параметра на результат расчета — смоделированный гидрограф. Это нечто вроде численного эксперимента. Но подход предельно субъективен. Процедура оптимизации параметров может быть организована. В таких обстоятельствах целесообразна методика нелинейного программирования. В силу сложности современных распределенных моделей формирования стока методы минимизации критерия качества не могут использовать производные. Такие методы обычно называют методами поиска, основанными на последовательных вычислениях гидрографа и критерия качества. В этом отношении они близки к методу проб и ошибок, но осуществляются по определенной программе. К тому же на такой поиск, скорее всего, следует наложить ограничения, например, установить предельные диапазоны возможных значений оцениваемых параметров.

Целесообразные критерии качества таковы: для существенно положительных величин (расходы, влажность почвы, запасы воды в снежном покрове)

$$KK = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|x_2 - x_1|}{x_1},$$

для величин, которые могут принимать отрицательные значения (температуры почвы),

$$KK = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|x_2 - x_1|,$$

где x_1, x_2 — соответственно наблюденные и рассчитанные величины.

Принцип оптимизации параметров внес определенные надежды в ряды гидрологов-модельеров, хотя сразу было ясно, что чем сложнее модель, тем проблематичнее становится задача оптимизации. Непреодолимым препятствием на пути решения этой задачи встали две связанные между собой главные причины порождения неустойчивости и неопределенности таких оценок: неадекватность моделируемых и природных процессов и взаимозависимость получаемых оценок различных параметров.

Создалась некая коллизия: с одной стороны, многие гидрологи понимают всю противоречивость и пагубность калибровки, с другой — без калибровки очень трудно обойтись. И все-таки калибровка — это более зло, чем благо. Именно калибровка порождает множество последствий, которые практика моделирования вряд ли сумеет преодолеть без каких-либо кардинальных решений. Ведь чем больше калибровка необходима для повышения работоспособности какой-либо модели, тем меньше надежд можно возлагать на эту модель. Более того, необходимость калибровки — это признание того факта, что гидролог перестает контролировать процесс моделирования.

Но следует ли отрицать калибровку абсолютно? Она должна быть сохранена в практике моделирования в двух формах.

Форма первая. Калибровка как надежный метод оценки конкретных параметров обратным путем должна осуществляться по наблюдениям за стоком на малых водосборах и за переменными состояния на метеорологических площадках и водно-балансовых станциях. Обязательным при этом является принцип: отдельный массив наблюденных данных — один параметр.

Форма вторая, касающаяся «моделируемых» бассейнов. Вместо тенденциозного слова «калибровка» было бы полезно ввести понятие «корректировка» по отношению к небольшой группе специально выделенных параметров. Такая корректировка должна

вестись в нешироких априорно установленных пределах изменения этих параметров, по принципу сравнения наблюденных и рассчитанных графиков хода во времени — стока в замыкающих створах главного и частных бассейнов, температуры и влажности почвы, запаса воды в снежном покрове, уровня грунтовых вод, глубин протаивания или промерзания почвы в отдельных точках бассейна. Имеется в виду как визуальное сходство графиков, так и выраженное величиной критерия качества. И опять важен принцип: один график — один параметр.

Иногда параметров может быть и два, но только в том случае, когда они связаны с различными сторонами используемого массива данных. Например, один связан со слоем стока, а другой с формой гидрографа. Помимо перечисленных графиков корректировка параметров может вестись при сопоставлении некоторых показателей, таких как продолжительность залегания и даты установления и схода снежного покрова, величин годового и месячного стока и суммарного испарения, максимальных глубин промерзания или протаивания, максимальных и минимальных расходов.

Валидация — более «невинный» этап процесса моделирования, но очень ответственный. Обычно он сводится к демонстрации нескольких рассчитанных и наблюденных гидрографов. В гидрологических публикациях можно встретить много рассуждений и дискуссий именно о валидации. Это вызвано актуальностью постоянно существующей дилеммы — достаточна валидация или недостаточна, приемлема она или неприемлема. Часто — это трудный вопрос, ибо все избегают применения объективных критериев. Присутствуют здесь и элементы субъективизма, ибо авторы склонны к большой снисходительности, когда дело касается их моделей.

В настоящее время сложилась следующая практика: наблюденные данные за стоком в замыкающем створе делятся на два периода — калибровки и валидации. При этом подчеркивается, что при валидации все параметры остаются без изменений после состоявшейся их калибровки. На первый взгляд — это логичная и в чем-то даже привлекательная процедура.

Но на проблему оценки адекватности полученных при моделировании результатов можно взглянуть и с другой стороны. Представим себе, что имеются длинные «ряды» годовых гидрографов стока, наблюденных и рассчитанных. Каждому году присущи свои «наилучшие» параметры. Все недостатки и неполнота моделей неизбежно приводят к этому факту. И проблема состоит вовсе не в том, чтобы оптимизировать эти параметры, осреднив их соответствующим образом. Это сделать просто. Проблема — в реальном существовании определенного «разброса» этих годовых параметров или, что то же самое, в варьировании критерия качества при

их осреднении. Можно ли уменьшить степень этого варьирования? Да, улучшив модель. Поэтому существующая практика «калибровки-валидации» довольно бессмысленна. Вернемся к многолетним «рядам» годовых гидрографов. Все рассчитанные гидрографы должны быть получены при одном и том же неизменном наборе параметров. Но для этого автору или пользователю модели должна быть предоставлена полная свобода действий при их оценке. Возможна любая корректировка (даже калибровка, если кто-то этого сильно пожелает) в пределах всего ряда. Единственное, но необходимое свидетельство о степени работоспособности модели — это статистика величин годовых критериев качества: их кривая распределения, их среднее значение за многолетие, их максимум и минимум. Естественно, что степень уверенности в надежности этих статистических данных как всегда связана с числом лет, принятых в расчет.

Пространственная неоднородность параметров

В свое время была высказана и пока никем не оспаривалась идея, что неоднородность гидрологических параметров — фундаментальная проблема гидрологии. Крайнее мнение достаточно пессимистично: неоднородность (гетерогенность) некоторых параметров, особенно это касается физических свойств почв, настолько велика, что их простое осреднение при моделировании не может быть использовано.

При высказывании этих соображений в стороне оставался вопрос о площади определения параметра при его измерении или другом способе оценки. Рассмотрим этот вариант на примере коэффициента фильтрации верхнего почвенного горизонта. Ниже приведены условные цифры, свидетельствующие о порядке величин пространственных коэффициентов вариации оценок этого параметра в пределах элементарного водосбора различными методами: площадь определения $S = 10^{-3}$ м^2 (фильтрационная трубка), $C_v = 10$; $S = 10^{-1}$ м^2 (полевой фильтрационный прибор), $C_v = 1$; $S = 10^2$ м^2 (дождевальная установка), $C_v = 0{,}1$; $S = 10^5$ м^2 (элементарный водосбор, оценка обратным путем по наблюдениям за осадками и поверхностным стоком), $C_v = 0$.

Затем факт большой неоднородности параметров был связан с проблемой масштаба, и в результате появилось множество суждений, больше эмоциональных, чем доказательных. Говоря о неоднородности параметров, в первую очередь имея в виду физические свойства почв, необходимо различать систематические и случайные вариации параметров на водосборе. Действительно, в пределах каждого склона наблюдаются систематические изменения характеристик почвы, растительности, поверхностной и подземной гидрографии. Попытки учесть эти изменения привели в

почвоведении к появлению понятия «катена», а в гидрологии — к моделям с переменной областью питания. Последние принимают в расчет изменение условий формирования стока у подножия склонов и на участках, непосредственно примыкающих к русловой сети. При этом обычно констатируется факт изменения во времени густоты гидрографической сети и длины склонов. На самом деле имеются в виду изменения формальных показателей, учитывающих переход временных водотоков из сухого состояния в обводненное, и наоборот. Учет таких явлений при моделировании возможен только для малых водосборов.

Таким образом, процесс формирования стока должен описываться адекватными алгоритмами с адекватными параметрами для некоторого идеализированного репрезентативного склона. Идеализированного в том отношении, что систематические и случайные неоднородности на этом склоне не принимаются во внимание. Или учитываются статистически — вместо конкретного значения параметра берутся несколько квантилей, равномерно распределенных по их вероятности между 0 и 1, и после соответствующих операций вычисленные гидрологические переменные осредняются.

Концепция репрезентативных элементарных склонов для распределенных моделей формирования стока представляется одной из важнейших. Параметры, оцененные обратным путем по материалам наблюдений на воднобалансовых станциях и экспериментальных водосборах и систематизированные для репрезентативных элементарных склонов в различных ландшафтах, довольно устойчивы.

В физически обоснованных распределенных моделях все параметры назначаются по априорным данным. Исключение могут составить и быть откорректированными специально отобранные «лимитирующие» параметры, число которых должно быть сокращено до минимума.

Проблема масштаба

Проблема масштаба считается фундаментальной и главной нерешенной задачей современного моделирования. Предполагается, что она останется в центре внимания гидрологии еще долгое время.

Названную проблему можно охарактеризовать несколькими основными положениями:

- параметры макромасштабных моделей — обобщенные параметры микромасштабных;
- законы и уравнения различны для разных масштабов;
- параметры одинаковых уравнений различны для различных масштабов;

• необходима универсальная методология масштабирования, позволяющая переходить от параметров одного масштаба к параметрам другого. Эта методология пока не развита, и ее появление в ближайшее время не ожидается;

• данные должны собираться в масштабе, свойственном масштабу моделирования.

Набор встречающихся в литературе по гидрологии определений масштабов довольно велик и недостаточно четок: большой и малый; микро-, мезо- и макро-; лабораторный, локальный, сетки моделирования, колонки, участка, склоновый, суббассейновый, бассейновый, континентальный, глобальный.

Проблема масштаба появилась вовсе не вследствие того, что она присуща самой природе явлений. Подлинные причины заключаются в неадекватности применяемых алгоритмов, в особенности в искусственно вводимой зависимости величин некоторых параметров от масштаба моделирования при неправильно выбранной модели бассейна. В частности, очень значимо, на первый взгляд вполне невинное, многократное преувеличение размеров пространственных элементов модели по сравнению с природными элементарными склонами. Это преувеличение неизбежно растет по мере увеличения площади бассейна.

В разделе «Принципиально различные модели речного бассейна» описаны два подхода к способу описания движения воды в бассейне. Можно констатировать, и специально проведенные исследования подтвердили это, что подход 1 порождает проблему масштаба, а подход 2 свободен от нее.

Таким образом, проблема масштаба не есть свойство моделируемого, а лишь флуктуация в мыслях «человека моделирующего».

Обобщение и систематизация параметров модели

Разработка математических моделей формирования стока должна сопровождаться одновременной систематизацией ее параметров. Последние призваны отобразить объективные физические особенности водосборов. Параметры модели должны быть обобщены и нормированы, составив определенный раздел информационной базы для моделирования процессов стока.

Вопрос обобщения параметров неразрывно связан с гидрологией ландшафтов. Информационное обеспечение моделирования в виде системы обобщенных и систематизированных параметров по всем природным зонам является необходимым условием для практического использования моделей. К сожалению, это условие почти никем не соблюдается.

Нет более прямого, конкретного и надежного способа изучения формирования стока и сравнительной оценки параметров

моделей, чем разумный анализ разумно организованных исследований и наблюдений в природе, например на «репрезентативных» и «экспериментальных» бассейнах. Но здесь тоже возникает некоторый важный вопрос: как эти наблюдения могут быть экстраполированы на другие объекты и собственно для чего проводятся бассейновые исследования? Ответ на этот вопрос таков: научными и практическими результатами бассейновых исследований должны быть оценка и систематизация параметров физически обоснованных распределенных моделей формирования стока.

Основные перспективы изучения стоковых процессов в природе связаны с наблюдениями на элементарных водосборах («микроводосборах»), которые представляют собой естественные образования, самой природой «приспособленные» именно для этого. В качестве оптимальных размеров микроводосборов можно рекомендовать 0,01 — 1,0 км^2. Микроводосборы должны соответствовать следующим основным требованиям: однородность поверхности, возможность надежного измерения стока, четкая выраженность водоразделов. Следует специально отметить полезность даже кратковременных наблюдений на микроводосборах, если они позволяют произвести приближенную оценку некоторых важных параметров.

Проблема генерализации

Одна и та же точка с одними и теми же координатами на картах разного масштаба всегда имеет разные значения высоты, уклона и ориентации. И это замечательно, ибо здесь лежит ключ к моделированию бассейнов самых разных размеров. Принцип генерализации, положенный в основу создания топографических и гипсометрических карт различных масштабов, берет на себя и обслуживание распределенного моделирования стока.

Генерализация — обобщение конкретных региональных единиц при уменьшении масштаба, когда расширение ареала нужно компенсировать сокращением содержания. Генерализация подчеркивает все существенное и устраняет второстепенные детали.

С проблемой генерализации связано целесообразное количество репрезентативных точек или узлов сетки, покрывающих площадь бассейна. Очевидно, что его пропорциональность последней недопустима в принципе. Разумное число таких точек может быть приближенно оценено по формуле

$$n = 10F^{0,2},$$

где F — площадь бассейна, км^2.

В случае когда территория сильно расчленена, ландшафтная картина очень пестра, а метеорологическая и параметрическая информация обильна, возможно увеличение n в 1,5—2 раза. В об-

ратном случае возможно соответствующее уменьшение. Рекомендуемый масштаб карты для получения характеристик точек тоже зависит от площади бассейна — $1:5000\sqrt{F}$.

7.4.5. Стохастическое моделирование

Характеристики стока и стохастическая гидрология

Характеристиками принято называть экстремальные или осредненные величины, так или иначе характеризующие годовые гидрографы стока — максимальные и минимальные, а также средние суточные, декадные, месячные и годовые расходы. Поскольку данные наблюдений обычно и представлены хронологическими последовательностями таких характеристик, то естественно возникновение проблемы изучения их повторяемости и упорядоченности во времени и пространстве. В гидрологии сформулирован и поставлен вопрос о колебаниях характеристик стока. Именно такая постановка дел и привела к созданию «стохастической гидрологии», поскольку этот вопрос может быть решен исключительно методами математической статистики. Более того, сама поставленная задача стохастична по своей сути.

В существенном, содержательном и математическом отношениях стохастическая гидрология не отличается от стохастических приложений других наук. Поэтому при стохастическом моделировании следует опираться на руководства и справочники математической статистики. Пользоваться только гидрологическими компиляциями последних достаточно опасно, так как легко повторить заблуждения своих предшественников.

Приложения статистических методов в гидрологии как бы подразделяются на две обратные друг другу задачи. Первая — это математическое описание непрерывных или дискретизированных случайных гидрологических величин, процессов и полей. Здесь выделяется очень важный вопрос — оценка параметров стохастических моделей. Вторая задача состоит в воспроизведении (генерировании) с помощью стохастических моделей и принципа Монте-Карло случайных величин, процессов и полей гидрологических величин. Эта задача, собственно, и называется стохастическим моделированием.

Существуют две основные цели стохастического моделирования:

1) многократное «размножение» массивов гидрологических данных для получения некоторых статистических выводов, сделать которые другим способом затруднительно (опасность — фетишизация полученных результатов и приписывание им большего смысла, чем это было заложено в модель);

2) обеспечение стохастического входа в детерминированные модели, например воспроизведение случайных величин, последовательностей и полей метеорологических элементов для использования в моделях формирования стока.

Стохастическая модель погоды

Стохастическая модель погоды призвана обеспечить вход детерминированных моделей формирования стока для решения ряда задач, представляющихся важными на пути создания методов расчетов стока нового поколения. Стоит задача — обеспечить возможность генерирования суточных (или за меньшие интервалы времени) значений метеорологических величин в заданных точках территории. Это, в первую очередь, суммы осадков и продолжительность их выпадения, а также средние температуры и дефициты влажности (или относительные влажности) воздуха. Весь этот поток моделируемой метеорологической информации должен быть адекватным природному. Особенности сезонного хода метеоэлементов, их временные и пространственные корреляции, климатические различия — все должно быть учтено.

В общем виде задача представляется неразрешимой или недопустимо сложной. К тому же постоянно следует иметь в виду необходимость обобщения и систематизации климатических параметров стохастической модели. Поэтому пространственно-временная структура системы случайных метеорологических полей должна быть «оптимально» упрощена.

Среди специфических статистических особенностей, требующих к себе внимания в рамках поставленной задачи, следует назвать следующие:

1. К распределениям суточных сумм осадков, получаемым по данным метеорологических станций, следует относиться как к «частично усеченным» в точке $H = 1$ мм. В диапазоне 0—1 мм на разных метеорологических станциях в среднем регистрируется от 80 до 20 % случаев выпадения осадков.

2. Моделирование факта выпадения осадков и их количества на системе пространственно распределенных точек должно осуществляться последовательно.

3. При пространственном моделировании суточных осадков их целесообразно нормировать по какой-либо устойчивой климатической характеристике, например по годовой сумме. Процедура оценки последней в любой точке бассейна, особенно в горных условиях, — задача самостоятельная и должна решаться вне стохастической модели погоды.

4. Лучше моделировать не дефицит влажности воздуха, необходимый в некоторых моделях формирования стока для расчета испаряемости, а относительную влажность, стохастически почти не

связанную с температурой. Пересчет относительной влажности в дефицит при данной температуре воздуха — задача почти тривиальная.

Особый интерес представляют пространственные корреляционные аспекты, связанные с генерацией полей суточных метеорологических величин. Приводим два примера пространственных корреляционных функций — относительной влажности воздуха (рис. 7.1) и вероятности выпадения осадков (рис. 7.2). В последнем случае следует обратить внимание на довольно любопытный факт — повышенную корреляцию твердых осадков (снегопады) по сравнению с жидкими (дожди).

7.4.6. Детерминированно-стохастическое моделирование

Взаимное проникновение детерминированного и стохастического подходов и совместное детерминированно-стохастическое моделирование — естественный шаг в плане более полного описания гидрологических процессов, особенно в условиях их нестационарности. Часто встречается термин «динамико-стохастическое» моделирование. Истоки и суть вопроса связаны с известным еще в традиционной гидрологии композиционным методом — методом определения вероятности функции нескольких переменных, статистическая природа которых предполагается известной. В данном случае на вид и сложность функции не накладывается никаких ограничений, хотя в математической статистике под композицией обычно подразумевают отыскание закона распределения только суммы случайных величин. Современное детерминированно-стохастическое моделирование ушло неизмеримо далеко от классического композиционного подхода.

Последовательность детерминированно-стохастического моделирования выглядит следующим образом:

- на выходе стохастической модели A (стохастическая модель погоды) генерируются последовательности метеорологических величин, поступающих на вход детерминированной модели (модели формирования стока);
- на выходе последней появляются имитированные характеристики стока, поступающие на вход стохастической модели B (выполняющей тривиальную задачу вычисления эмпирической функции распределения);
- на выходе стохастической модели B фигурируют координаты кривых распределения любых заданных характеристик стока.

Именно такая технологическая цепь лежит в основе методов гидрологических расчетов нового поколения.

Итак, совмещение детерминированной модели формирования стока и стохастической модели погоды позволяет вычислять ко-

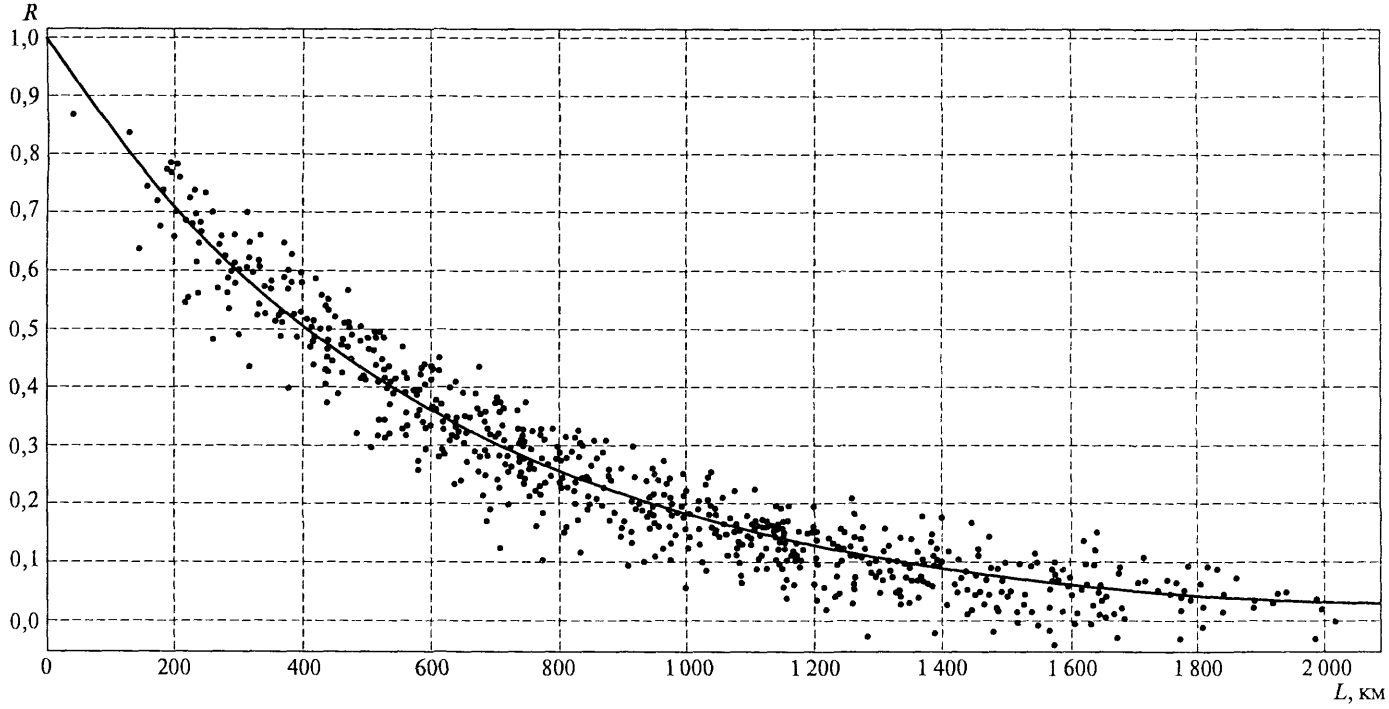


Рис. 7.1. Пространственная корреляционная функция суточной относительной влажности воздуха (бассейн р. Волги и прилегающие территории):

R — коэффициент корреляции; L — расстояние между двумя метеостанциями; • — дожди

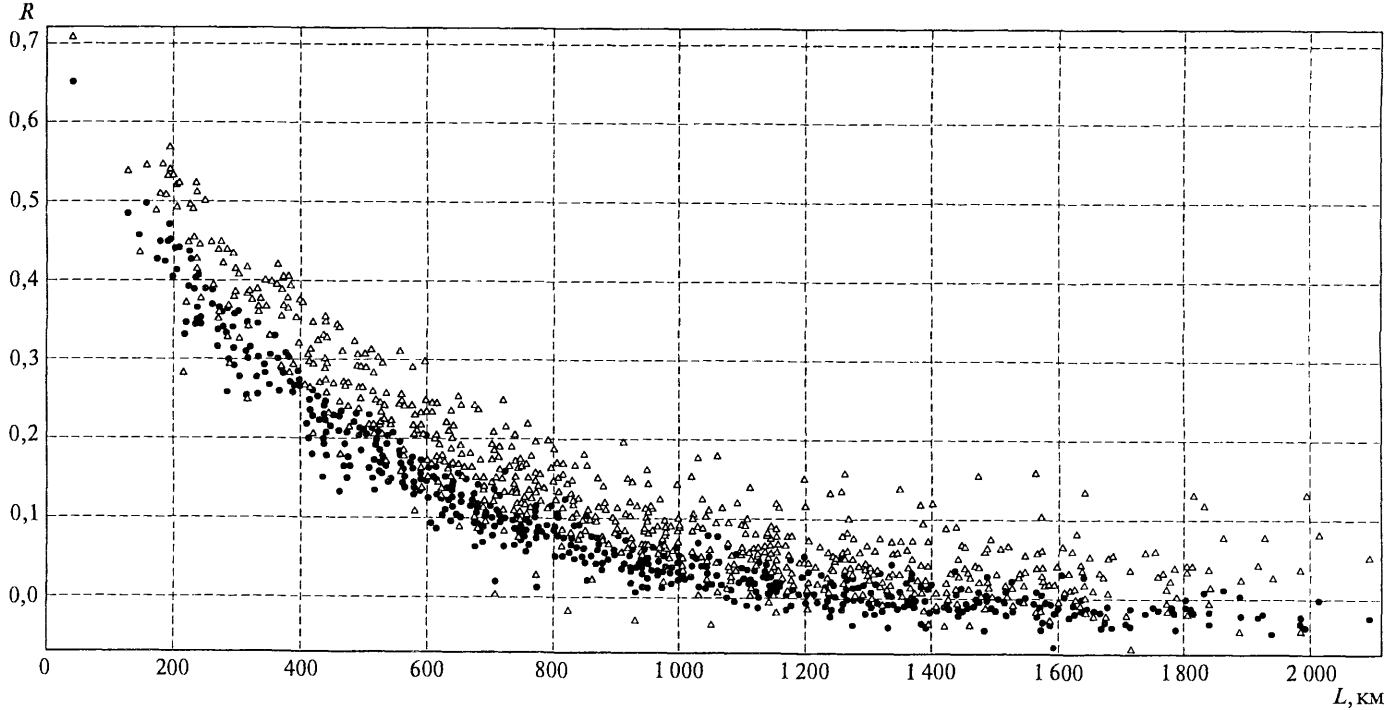


Рис. 7.2. Пространственная корреляционная функция вероятности выпадения осадков (бассейн р. Волги и прилегающие территории):

R — коэффициент корреляции; L — расстояние между двумя метеостанциями; • — дожди; Δ — снегопады

ординаты кривых распределения годовых, месячных, суточных, максимальных и минимальных расходов. Замечательно, что такие системы кривых распределения характеристик стока могут быть получены как для прошлых, так и для настоящих и будущих условий и ситуаций в бассейне, в том числе и с учетом изменений ландшафтов и климата. В этом — сила детерминированно-стохастического моделирования.

7.4.7. Перспективы моделирования речного стока

Перспективы моделирования процессов формирования стока — это перспективы гидрологии в целом. Будущее моделирования связано с тем, насколько удачно будут решены следующие задачи.

1. Осуществление полного перехода к универсальным моделирующим системам, предназначенным для бассейнов любых размеров и расположенных в самых различных географических условиях. При этом многие скрытые недочеты смогут выйти наружу.

2. Достижение возможности сравнения гидрологической и математической сущности различных моделей и их работоспособности. С этой целью должны публиковаться подробные сведения о физической обоснованности моделей и об их алгоритмической и параметрической системах. При этом не должны скрываться «секреты кухни» моделирования.

3. Создание системы тестов с более или менее утрированными входными данными и параметрами и известным ожидаемым результатом, предназначенных для первичного представления о моделях на экспертном уровне.

4. Достижение адекватности описания процессов стока. Многие сложившиеся представления о последних подлежат пересмотру.

5. Рационализация алгоритмических систем моделей.

6. Построение для каждой моделирующей системы оболочки, допускающей доступ к модели лиц, не принимавших участия в ее разработке.

7. Обобщение и систематизация параметров модели по ландшафтным и прочим географическим условиям.

8. Конструирование стохастических моделей погоды.

9. Подготовка руководств по моделированию стока, ориентированных на конкретные модели.

Решению перечисленных задач будет способствовать вынос на широкое обсуждение гидрологической общественности:

- перечня желательных и достаточных входных метеорологических величин;
- перечня параметров детерминированных моделей с их физическим обоснованием и рассмотрением способов их оценки и корректировки;

• идей пересмотра проблем калибровки, валидации и масштаба;

• критериев согласия рассчитанных и наблюденных гидрографов стока и переменных состояния в отдельных точках бассейнов;

• разделения принципов и приемов моделирования на три ранга: общепринятые, дискуссионные, ошибочные; можно предположить, что со временем некоторые принципы и приемы сумеют или будут вынуждены изменить свой ранг.

7.5. Математическая статистика в гидрологии

7.5.1. Общие положения

Математическая статистика построена на основе теории вероятностей. Если последняя является одной из математических наук, исследующей достаточно абстрактные взаимоотношения вероятностей случайных событий, то математическая статистика имеет более прикладной характер. Она может быть определена как раздел математики, посвященный методам сбора, обработки, систематизации, интерпретации и использования данных для научных и прикладных выводов. В первую очередь это касается данных количественных. Отсюда можно сделать важный вывод, что математическая статистика со всеми своими теоретическими положениями, определениями и методами имеет области своих приложений в любой отрасли науки или других областях человеческой деятельности. Она широко используется и в гидрометеорологии, и, конечно, в гидрологии в частности. И всегда необходима разумная проверка истинности того, что статистические методы пригодны и применимы при решении каждой конкретной гидрологической задачи.

В дальнейшем в центре нашего внимания везде будет присутствовать понятие вероятности. Вероятность, в общем случае, — это числовая характеристика степени возможности наступления какого-либо определенного события. Вероятность, в принципе, может иметь различные интерпретации:

• как абстрактная мера, связанная с аксиоматикой А. Н. Колмогорова (о ней будет сказано ниже);

• как субъективистская (персоналистская) мера той силы, с которой некто верит в данное событие;

• как наша предрасположенность к событию, которое в силу привходящих обстоятельств должно наступить; такую предрасположенность можно трактовать и как результат прогнозирования;

• как частота появления интересующего нас события; вокруг этой концепции разворачиваются философские рассуждения, касающиеся различия между возможным и действительным в том

плане, что вероятность обычно касается единичного факта, а частота — некоторого их множества.

В литературе по гидрологии часто понятие вероятности подменяется термином «обеспеченность». Обеспеченность — это вероятность превышения некоторой гидрологической случайной величины. Понятие введено гидрологами с чисто утилитарной позиции, связанной с проблемой хозяйственного водообеспечения. Это понятие приобретает несколько иронический смысл в случае указания на вероятность катастрофических гидрологических явлений, где его применение нецелесообразно.

Приводим несколько важных понятий математической статистики, используемых ниже, что, конечно, не может заменить обращения к соответствующим учебникам, руководствам и справочникам.

Функция распределения (вероятностей) $F(Q)$ определяет вероятность того, что случайная величина Q примет значение, большее конкретной величины Q_i. Обращаем внимание на условие $Q > Q_i$. Это гидрологическая традиция, в математической статистике обычно используется обратное условие $Q < Q_i$. Очевидно, что суть дела от этого не меняется, данное обстоятельство просто следует иметь в виду. Первая производная от функции $F(Q)$ — плотность вероятности $\varphi(Q)$. Иногда функцию $\varphi(Q)$ называют дифференциальной функцией (законом), а $F(Q)$ — интегральной или кумулятивной.

Следует различать три вида функции распределения: истинную $F(Q)$, которая в гидрологических приложениях всегда остается неизвестной и в соответствии с которой природа генерирует свои реализации наших гидрометеорологических наблюдений, эмпирическую $F^*(Q)$ и аналитическую $F^{**}(Q)$, которой мы аппроксимируем эмпирическую функцию распределения.

В математической статистике широко используются разного рода меры отклонения значений случайных чисел от определенных точек на числовой оси, на плоскости или в n-мерном пространстве. Функция расстояния между двумя точками какого-либо множества носит название *метрики*. Эта функция, например, может быть самим расстоянием (равномерная метрика), квадратом расстояния (квадратичная метрика) или быть какой-нибудь другой. В зависимости от заданной метрики, даже для одного и того же множества, мы попадаем в различные метрические пространства.

В силу некоторых особенностей подхода L_1 (громоздкость некоторых расчетов) более употребительным оказался подход L_2, однако его временные преимущества в наше компьютерное время уже давно утрачены. Но квадратическая метрика приводит к некоторым аномальным эффектам и неправильным представлениям. Подход же L_1 более естественен (и это было ясно еще в начале XX в., когда Лежандр и Лаплас вводили в обиход метод наимень-

ших квадратов) и использование его свойств не обременено ненужными условиями.

Рассмотрим, какие элементы теории статистики, имеющие одно и то же назначение, основаны на подходах L_1 и L_2.

L_1: среднее арифметическое; среднее абсолютное отклонение; метод наименьших абсолютных отклонений; критерии согласия Колмогорова, Смирнова и Реньи.

L_2: среднее квадратичное; среднее квадратичное отклонение, дисперсия; метод наименьших квадратов; критерии согласия χ^2 и Крамера — Мизеса.

Если Q_1, Q_2, ..., Q_n — ряд наблюдений случайной величины Q с функцией распределения $F(Q)$, то составленная из них последовательность в убывающем порядке (традиция, принятая в гидрологии, в общем случае — в возрастающем порядке) называется вариационным рядом, а каждый член этого ряда — порядковой статистикой.

Медиана $Me(Q)$ — центральный член вариационного ряда, если n нечетно, и полусумма двух центральных членов в случае, если n четно. Аналитически это отображается выражением

$$\int_0^{Me(Q)} \varphi(Q)dx = \int_{Me(Q)}^{\infty} \varphi(Q)dx = 1/2.$$

Мода $Mo(Q)$ — значение случайной величины Q, соответствующее максимуму плотности вероятности $\varphi(Q)$. Функции плотности вероятности могут быть унимодальными (одномодальными) и полимодальными (мультимодальными, многомодальными).

Математическое ожидание $M(Q)$, оно же среднее арифметическое, случайной величины Q:

$$M(Q) = \int_0^{\infty} Q\varphi(Q)dQ; \quad M(Q) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Q_i,$$

$M(Q)$, $Mo(Q)$, $Me(Q)$ — три числовые характеристики положения центра группирования значений случайной величины Q. Характеристиками рассеивания значений этой величины относительно центра группирования являются:

среднее абсолютное отклонение $A(Q)$ случайной величины Q:

$$A(Q) = \int_0^{\infty} |Q_i - Me(Q)|\varphi(Q)dQ; \quad A(Q) = \frac{1}{n}\sum_{i-1}^{n} |Q_i - Me(Q)|;$$

дисперсия $D(Q)$ случайной величины Q:

$$D(Q) = \int_0^{\infty} [Q_i - M(Q)]^2\varphi(Q)dQ; \quad D(Q) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} [Q_i - M(Q)]^2;$$

среднее квадратичное отклонение $S(Q)$ случайной величины Q:

$$S(Q) = \sqrt{D(Q)}.$$

Закон (функция) распределения — соотношение, устанавливающее аналитическую связь между возможными значениями случайной величины Q и соответствующими вероятностями $p(Q)$. Общее обязательное условие для всех функций распределения:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(Q)\, dQ = 1.$$

Здесь функция $\varphi(Q)$ носит название «плотности вероятности».

В качестве двух примеров законов (функций) распределения приведем следующие:

1. Закон нормального распределения:

$$\varphi(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S(Q)} \exp\left\{-\frac{[Q - M(Q)]^2}{2S^2(Q)}\right\}, \quad -\infty < Q < \infty;$$

2. Закон Лапласа (двойной экспоненциальный):

$$\varphi(Q) = \frac{1}{2A(Q)} \exp\left[-\frac{|Q - Me(Q)|}{A(Q)}\right], \quad -\infty < Q < \infty.$$

Законы распределения могут быть дискретными и непрерывными, одно- и многомерными.

Например, для двухмерных распределений помимо параметров двух одномерных распределений появляется еще один параметр (всего пять) — коэффициент корреляции, который представляет собой меру зависимости двух случайных величин Q_1 и Q_2. При функциональной зависимости этих величин он равен единице, а при их независимости — нулю. Коэффициент корреляции, соответственно для подходов L_1 и L_2, определяется следующими выражениями:

$$\rho(Q_1, Q_2) = 1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left|\vartheta(Q_1) - \vartheta(Q_2)\right|_i;$$

$$r(Q_1, Q_2) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} [U(Q_1)U(Q_2)]_i.$$

Здесь использованы нормированные случайные величины $\vartheta(Q) = [Q - Me(Q)]/A(Q)$ и $U(Q) = [Q - M(Q)]/S(Q)$. Они имеют соответственно медиану или математическое ожидание, равные

нулю, и абсолютное или среднее квадратичное отклонения, равные единице, что позволяет рассматривать нормированные случайные величины зависящими только от законов распределения, но не от их параметров.

Уравнения линейной равномерной (лапласовой) и квадратичной (нормальной) регрессий, т.е. линейных зависимостей соответственно условных медиан (L_1) и условных математических ожиданий (L_2), величины Q_2 от конкретных значений величины Q_1 (или наоборот) имеют следующий вид:

$$Me(Q_2/Q_1) = Me(Q_2) + \rho(Q_1, Q_2)[A(Q_2)/A(Q_1)][Q_1 - Me(Q_1)];$$
$$A(Q_2/Q_1) = A(Q_2)[1 - \rho(Q_1, Q_2)];$$
$$M(Q_2/Q_1) = M(Q_2) + r(Q_1, Q_2)[S(Q_2)/S(Q_1)][Q_1 - M(Q_1)];$$
$$S(Q_2/Q_1) = S(Q_2)\sqrt{1 - r^2(Q_1, Q_2)}.$$

7.5.2. Основная задача математической статистики в гидрологии

Основной задачей применения статистических методов в гидрологии была и остается задача построения кривых распределения характеристик стока и других гидрометеорологических величин.

Традиционно это делается по следующей схеме:

1. Хронологический ряд наблюдений за случайной гидрологической величиной располагается (упорядочивается) в убывающем порядке, т.е. компонуется вариационный ряд (последовательность порядковых статистик).

2. Каждому члену вариационного ряда ставится в соответствие (назначается, вычисляется) эмпирическая вероятность (относительная частота появления). Здесь присутствует целый ряд проблем, связанных с получением приемлемой оценки этой вероятности.

3. Исходя из характера эмпирической функции распределения выбирается подходящий вид соответствующей аппроксимирующей (часто неправильно называемой «теоретической») аналитической функции распределения. В гидрологии поражает ограниченность и тенденциозность выбора таких аппроксимаций, связанного с некоторыми необоснованными традициями.

4. По данным наблюдений вычисляются определенные статистические функции (правдоподобия, моментные, квантильные, положения и рассеивания), приспособленные для приближенного определения значений параметров аналитического закона распределения. Обычно забывается, что при этом всегда теряется неко-

торая часть информации, присутствующей в исходном вариационном ряде.

5. В конечном счете оценивается закон распределения (выбор аналитического выражения плюс оценка параметров).

6. Проводится визуальная оценка графического сопоставления эмпирической и аналитической функций распределения. При этом чаще всего не обращают внимания на несогласованность принятых условностей при оценках эмпирических вероятностей и параметров аналитических кривых распределения.

В настоящее время вырисовывается возможность объединить четыре последних из шести указанных последовательных этапов. В результате объединенный этап может быть сформулирован следующим образом.

7. Подбирается подходящая аналитическая функция распределения, и ее параметры непосредственно оцениваются при аппроксимации ею эмпирической функции распределения в условиях минимизации подходящего критерия, который может трактоваться как один из возможных критериев согласия.

Изложенная процедура осложняется сопутствующими дополнительными проблемами:

- ограниченностью информации (недостаточностью длины рядов наблюдений);
- смещенностью оценок параметров;
- зависимостью наблюдений (внутрирядной связанностью).

В дополнение к главной задаче в стохастической гидрологии появились и другие направления, такие, как:

- рассмотрение последовательностей характеристик стока как стохастических (вероятностных, случайных) процессов (функций);
- исследование многомерных распределений и процессов;
- пространственные стохастические проблемы.

Однако все они, в конечном счете, позволяют или расширить основную задачу, или уточнить эффективность ее решения.

7.5.3. Эмпирическая функция распределения

В основе статистических выводов, которые может сделать гидролог о закономерностях поведения комплекса случайных гидрологических и метеорологических величин, лежат ряды наблюдений. В курсах математической статистики обычно идет речь о выборке, о выборочном методе. Тем самым предполагается возможность активного эксперимента. В нашем же случае к выборке, эксперименту приравниваются наблюдения, фиксация того, что сама природа соблаговолит нам выдать из своей гипотетической генеральной совокупности.

Фундаментальные основы математической статистики с ключевыми словами из гидрологии

Применение теории вероятностей к «действительному миру опыта» (по А. Н. Колмогорову) происходит по следующей схеме:

1. Предполагается существующим некоторый комплекс природных условий S, допускающий неограниченное число реализаций.

2. В результате осуществления условий S совершается определенный круг гидрометеорологических событий, таких как приход маловодных и многоводных периодов, прохождение паводков и селевых потоков, сход снежных лавин, наступание и отступание ледников, превышение определенных значений расходов воды в реках, температуры или влажности воздуха, скорости ветра, слоя или интенсивности осадков.

3. Если после реализации условий S осуществившийся на практике вариант событий окажется принадлежащим к определенному какими-либо условиями множеству A, то говорят, что наступило событие A.

4. Каждому гидрологическому событию A можно поставить в соответствие определенное действительное число $p(A)$, обладающее следующими свойствами:

- $0 \le p \le 1$;
- если комплекс условий S будет повторен n раз, и это n будет достаточно велико, и если m — число случаев, отмеченных появлением события A, то отношение m/n будет мало отличаться от $p(A)$;
- если $p(A)$ очень мало, то практически можно быть уверенным, что при однократной реализации условий S событие A не осуществится.

Далее в центре нашего внимания оказывается понятие о вариационном ряде (последовательности порядковых статистик)

$$Q_1 \le Q_2 \le \ldots \le Q_n,$$

получаемом ранжированием ряда наблюдений, т. е. расположением его членов в возрастающем порядке, и эмпирической функции распределения:

$$F_1^*(Q) = \begin{cases} 0, & Q < Q_1 \\ m/n, & Q_m \le Q < Q_{m+1} \quad m = 1, 2, \ldots, n-1 \\ 1, & Q \ge Q_n \end{cases}$$

или

$$F_2^*(Q) = \begin{cases} 0, & Q \le Q_1 \\ m/n, & Q_m < Q \le Q_{m+1} \quad m = 1, 2, \ldots, n-1. \\ 1, & Q > Q_n \end{cases}$$

Таким образом, в математической статистике принята следующая трактовка основных положений, определяющих сущность эмпирической функции распределения:

1. Значение эмпирической функции распределения в произвольной точке Q_m равно относительной частоте события $Q < Q_m$:

$$F_1^*(Q) = m(Q < Q_m)/n,$$

или $Q \le Q_m$:

$$F_2^*(Q) = m(Q \le Q_m)/n,$$

где $m(Q \le Q_m)$ и $m(Q < Q_m)$ — число членов вариационного ряда общим объемом n, удовлетворяющих условию, записанному в скобках.

2. Относительные частоты m/n являются несмещенными, наилучшими оценками для вероятностей $p(Q < Q_m)$ и $p(Q \le Q_m)$, т.е. среди всех несмещенных оценок имеют наименьшую дисперсию.

3. Эмпирическая функция распределения $F^*(Q)$ при $n \to \infty$ сходится по вероятности к истинной функции распределения $F(Q)$.

4. Функция $F^*(Q)$ претерпевает разрыв в точках, соответствующих членам вариационного ряда $Q_1 < Q_2 < \ldots < Q_n$, всякий раз скачкообразно изменяясь на величину $1/n$, в результате чего график функции имеет ступенчатый характер. В промежутках между соседними членами вариационного ряда функция $F^*(Q)$ сохраняет постоянное значение.

5. $F^*(Q) = 0$ для $Q < Q_1$ или $Q \ge Q_1$, $F^*(Q) = 1$ для $Q \ge Q_n$ или $Q > Q_n$.

Создавая в принципе, безусловно, правильные предпосылки для определения эмпирической функции распределения, перечисленные положения не исчерпывают проблемы: в стороне остается вопрос о практических приемах дальнейшего использования $F^*(Q)$, представленной в описанном виде, а также о принципах выбора одной из двух возможных функций $F_1^*(Q)$ и $F_2^*(Q)$.

Гидрологическая специфика проблемы

В гидрологии принято иметь дело с вариационными рядами, расположенными не в возрастающем, а в убывающем порядке:

$$Q_1 \ge Q_2 \ge \ldots \ge Q_n.$$

В этом случае эмпирическая функция распределения соответственно принимает вид:

$$F_3^*(Q) = \begin{cases} 0; & Q > Q_1 \\ m/n; & Q_m \ge Q > Q_{m+1};\ m = 1, 2, \ldots, n-1 \\ 1; & Q \le Q_n \end{cases}$$

и

$$F_4^*(Q) = \begin{cases} 0; & Q \geq Q_1 \\ m/n; & Q_m > Q \geq Q_{m+1};\ m = 1, 2, \ldots, n-1. \\ 1; & Q < Q_n \end{cases}$$

Гидрологов всегда смущал тот факт, что оценка вероятностей по формуле $p^* = m(Q_1 \geq Q_m)/n$ при $m = n$ равна единице. Безучастное отношение гидрологов к формуле $p^* = m/n$, столь основательно присутствующей в математической статистике, должно было бы получить достаточно серьезное толкование.

Существует и другая возможность — оценивать математическое ожидание, или моду, или медиану бета-распределения как распределения порядковых статистик. В этом случае все три варианта могут быть обобщены с помощью выражения

$$p^* = (m - \alpha)/(n + 1 - 2\alpha).$$

Тогда для математического ожидания $\alpha = 0$, для моды $\alpha = 1$ и для медианы $\alpha = 0{,}2929$. В последнем случае решение является приближенным. Учитывая особые свойства медианы как естественного центра распределения при любых типах последнего рекомендуем «медианный» вариант формулы эмпирической вероятности

$$p^* = (m - 0{,}2929)/(n + 0{,}4142).$$

Однако имеется гораздо более полноценный способ оценки эмпирического распределения, впрочем, достаточно близкий по результату только что рассмотренному «медианному». Возвратимся к формуле $p^* = m/n$. Именно ее и следует рекомендовать для использования, тем более что она фигурирует абсолютно во всех руководствах по математической статистике, но только после следующего преобразования вариационного ряда:

исходный ряд: $Q_1 \geq Q_2 \geq Q_3 \geq \ldots\ Q_{n-1} \geq Q_n$;

преобразованный ряд: $Q_{12} > Q_{23} > \ldots > Q_{n-1,\,n}$,

где $Q_{12} = (Q_1 + Q_2)/2$ и т.д. Очевидно, что каждому члену преобразованного ряда будет соответствовать вероятность $p^* = m/n$, где m — число членов ряда, соответствующее условию $Q_m > Q > Q_{m+1}$. Следует иметь в виду, что в преобразованном ряде число его членов на единицу меньше, чем в исходном. Но возможно (и целесообразно) добавление двух дополнительных членов — максимального Q_1 и минимального Q_n с точными индивидуальными оценками их вероятностей:

$$p_1^* = 1 - \exp(-\ln 2/n) \text{ и } p_n^* = \exp(-\ln 2/n).$$

7.5.4. Аналитическая функция распределения

Для расчетных целей эмпирические функции распределения необходимо аппроксимировать подходящими аналитическими выражениями. Последние — аналитические функции распределения — связующее звено между самыми общими представлениями о гидрометеорологических процессах и явлениях и свойствами эмпирических данных. Относительно функций распределения можно высказать пожелание, чтобы их обоснование было как можно проще, число параметров — минимальным и сами параметры четко бы интерпретировались (Д. Кокс, Д. Хинкли. Теоретическая статистика. М., 1978).

Процедура использования аналитических распределений тривиальна. Ее обычно именуют сглаживанием, подбором или «подгонкой» аналитической кривой к наблюденным частотам. Каких-либо специфических чисто гидрометеорологических подходов к этому, в силу общности средств математической статистики для всех наук, не существует, как не существует и чисто гидрологического содержания при выводе подходящих аналитических функций распределения.

Тем не менее, специфический анализ и логическое сопоставление аналитических и эмпирических распределений должны предшествовать использованию формальных алгоритмов. Нарушение этого принципа особо опасно при бездумном использовании имеющихся под рукой статистических компьютерных «пакетов». Это заводит нас в своего рода интеллектуальный тупик, когда мы перестаем осознано контролировать свои подходы и действия.

В принципе число аналитических функций распределения представляется неограниченным. Однако по мере усложнения математических конструкций снижается практическая целесообразность их использования. Очень условно можно выделить два основных класса распределений:

1) распределения, полученные в результате идеализированной вероятностной схематизации (нормальное, лапласово, показательное, равномерное);

2) распределения, полученные в результате преобразования исходной переменной в новую, распределенную по какому-либо известному закону.

Последний класс распределений очень привлекателен, и мы рассмотрим его более подробно. Он основан на том факте, что если случайная величина x, имеющая плотность вероятности $\varphi_1(x)$, связана с интересующей нас величиной Q соотношением $x=f(Q)$, то плотность вероятности

$$\varphi_2(Q) = \varphi_1[f(Q)]f'(Q).$$

В качестве преобразуемых законов логичнее всего использовать нормальный (подход L_2), что обычно и делается, или двойной экспоненциальный Лапласа (подход L_1). Что касается примеров функций преобразования, превращающих случайные гидрометеорологические величины в нормальное или лапласово распределение, то их было предложено довольно много: например, $x = (Q + 1)^n \ln Q$, $x = \exp(nQ) \ln Q$, $x = (Q^n - 1)/n$ при $n \neq 0$, $x = \ln Q$ (приводит к известному логарифмически нормальному закону), $x = Q - \frac{1}{Q}$ (преобразование Картвелишвили); здесь n — параметр функции преобразования.

Помимо простоты этих двух законов в их пользу говорит также разработанное их информационное и теоретическое сопровождение, особенно это, конечно, касается нормального распределения. В частности переход к многомерности в этом единственном случае не сопровождается лавиной трудноразрешимых проблем.

В российской гидрологической практике наибольшее распространение нашла кривая распределения Крицкого — Менкеля, хотя за рубежом она признания не получила. Это распределение было получено преобразованием широко известного двухпараметрического гамма-распределения, известного также под названием распределения Пирсона 3-го типа:

$$\varphi(Q) = \begin{cases} \lambda^{\alpha} Q^{\alpha-1} \exp(-\lambda Q)/\Gamma(\alpha), & Q > 0, \\ 0, & Q \leq 0, \end{cases}$$

где λ — параметр масштаба; α — параметр формы.

Было сделано ничем не оправданное «упрощение»: параметры формы и масштаба были приняты равными друг другу. В результате возникла однопараметрическая функция распределения

$$\varphi(Q) = \alpha^{\alpha} Q^{\alpha-1} \exp(-\alpha Q)/\Gamma(\alpha).$$

Последняя после двойного преобразования $x = y^{1/\beta}$ и $y = y_0 \frac{Q}{Q_0}$ в конечном счете приобрела вид

$$\varphi(Q) = \left[\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)}\right]^{\alpha/\beta} \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^{(\alpha/\beta)-1} \frac{\exp\left\{-\left[Q\Gamma(\alpha+\beta)/Q_0\Gamma(\alpha)\right]^{1/\beta}\right\}}{\left[\Gamma(\alpha)\beta Q_0\right]}.$$

Здесь Г(...) — обозначение гамма-функции.

Всегда полезными остаются попытки испытания новых (предположительно достойных) кривых распределения в гидрологических задачах.

7.5.5. Оценка параметров аналитических функций распределения

Эмпирическая функция распределения как реализованный природой и измеренный человеком прообраз истинной функции распределения, имеющая в своей основе вариационный ряд как упорядоченную последовательность наблюдений за некоторой случайной величиной, обладает максимально возможной информацией, содержащейся в этих наблюдениях. Наиболее элементарной, но в то же время и фундаментальной задачей математической статистики является нахождение для эмпирической функции распределения соответствующей ей аналитической функции. В реальности это сводится к проведению последней в наибольшей близости к системе «точек» эмпирического распределения. Решение названной задачи подразделяется на три этапа:

1) выбор подходящей по своим пределам и графическим очертаниям аналитической функции распределения;

2) непосредственная оценка параметров последней;

3) визуальная или численная оценка удовлетворительности решения поставленной задачи — сравнение эмпирической и аналитической функций распределения.

В основе общепринятой схемы оценки параметров аналитической функции распределения лежит идея сопоставления числовых характеристик величин, составляющих ряды наблюдений, и аналитических выражений этих же характеристик. Различие в методах оценки состоит лишь в сущности последних и в способах их получения. Количество избранных характеристик обычно принимается равным числу параметров аналитической функции распределения.

Вообще попытка охарактеризовать ряд наблюдений небольшим набором таких показателей, которые объявляются исчерпывающими характеристиками, неизбежно приводит к потере информации. Среди наиболее распространенных характеристик такого ряда в первую очередь можно назвать средние аналитические величины, моду, медиану, размах, моменты разного порядка, функции правдоподобия и другие менее употребительные показатели. Использование некоторых из них регламентировано в известных методах моментов и максимального правдоподобия.

Метод моментов в настоящее время представляет интерес больше с исторической точки зрения, что же касается метода максимального (наибольшего) правдоподобия, то он считается наиболее известным, эффективным и важным с теоретической точки зрения общим методом нахождения оценок. Завоевал он популярность и среди гидрологов. Вообще же оценка параметров по мето-

ду максимального правдоподобия «вопреки утверждениям многих учебников... не является универсально хорошей процедурой и не должна применяться догматически». Известно, что оценки максимального правдоподобия не всегда достаточны и состоятельны. Обычно этот метод оправдывается в тех случаях, когда оценки максимального правдоподобия получить очень легко. Практика его применения для распределений, обычно используемых в гидрологии, показала обратное, и в результате появился так называемый метод приближенно наибольшего правдоподобия.

Методам моментов и максимального правдоподобия часто сопутствует излишняя громоздкость расчетных алгоритмов и проблема смещения оценок, ускользающая из-под контроля.

Общеизвестны требования к оценкам: состоятельность, несмещенность, эффективность.

Оценка θ^* параметра θ называется *состоятельной*, если она «сходится по вероятности» к θ при неограниченном возрастании объема выборки. Требование состоятельности обычно удовлетворяется в большем числе случаев.

Оценку θ^* параметра θ принято называть *несмещенной*, если математическое ожидание этой оценки равно θ (классическая несмещенность). Альтернативный вариант условия несмещенности состоит в замене математического ожидания медианой (медианная несмещенность). Несмещенность следует понимать как отсутствие систематических ошибок при оценке параметров. Эффективная, или наилучшая несмещенная, оценка должна обладать по сравнению с другими несмещенными оценками наименьшей дисперсией.

Наиболее проблематичной является возможность смещения при оценке параметров. Считается общепринятым, что во всех случаях имеется возможность внести поправку на смещение путем надлежащего «исправления» оценки умножением на некий поправочный коэффициент. Однако этот путь чреват многими неконтролируемыми последствиями, связанными с исчислением различных статистических характеристик в различных метрических пространствах.

Таким образом, все три последовательных этапа решения задачи, поставленной в начале этого раздела, оказываются недостаточно достоверными:

- при выборе подходящей аналитической функции распределения в гидрологии используют недопустимо ограниченный набор моделей, неполная приемлемость которых уже достаточно очевидна;
- система оценки параметров этих моделей чаще всего не остается свободной от смещения;
- обычно визуальная, и очень редко оцененная количественно, сходимость аналитических и эмпирических данных разочаро-

вывает, в первую очередь по причине смещения координат эмпирических функций распределения.

Нарисованная картина неудовлетворительного состояния с оценкой параметров явилась следствием решения задачи в условиях неосознанного «посещения» различных метрических пространств.

В принципе имеется возможность прямой оценки параметров аналитических функций распределения, используя для этого всю эмпирическую функцию распределения. Задача при этом формулируется очень естественно и просто: через точки эмпирической кривой распределения необходимо провести аналитическую кривую наилучшим образом. Оценка параметров последней при этом осуществима в условиях минимизации некоего критерия качества целевой функции, учитывающего расхождение между аналитической и эмпирической вероятностями, соответствующими каждому члену вариационного ряда Q_m.

При условии, что координаты эмпирической функции распределения не смещены, проблема смещения аналитической функции не возникает. Одновременно решается задача количественного и визуального их сравнения, ибо противоречий между методологическими подходами при оценке координат эмпирической и параметров аналитической функций распределения в этом случае не существует.

В качестве самого простого примера подходящего критерия качества для его минимизации при оценке параметров аналитической кривой распределения может послужить следующий:

$$W = \begin{cases} \dfrac{1}{n}\sum\limits_{m=1}^{n}\left[\left|p_m^{**} - p_m^{*}\right| / p_m^{*}\right], & \text{если} \quad p_m^{*} \le 0{,}5, \\ \dfrac{1}{n}\sum\limits_{m=1}^{n}\left[\left|p_m^{**} - p_m^{*}\right| / (1 - p_m^{*})\right], & \text{если} \quad p_m^{*} > 0{,}5. \end{cases}$$

Здесь p^{**} — аналитическая и p^{*} — эмпирическая вероятность.

7.5.6. Критерии согласия

Различаются три вида функций распределения: *истинная* $F(Q)$, которая в гидрологических приложениях всегда остается неизвестной и в соответствии с которой природа генерирует реализации гидрометеорологических наблюдений; *эмпирическая* $F^{*}(Q)$ (подразд. 7.5.3); *аналитическая* $F^{**}(Q)$ (подразд. 7.5.4). С взаимоотношением этих трех видов функций распределения связан вопрос о доверии к методам статистической обработки и к информации, содержащейся в наблюдениях.

Подходящими критериями согласия при сравнении различных типов функций распределения являются:

• критерий Колмогорова, позволяющий построить для эмпирической функции распределения $F^*(Q)$ доверительные границы вероятной полосы существования истинной функции распределения $F(Q)$;

• критерий Смирнова, подтверждающий или опровергающий гипотезу — извлечены ли две выборки $F_1^*(Q)$ и $F_2^*(Q)$ из одной и той же генеральной совокупности $F(Q)$;

• критерий, представленный в подразд. 7.5.5 и свидетельствующий о близости аналитической $F^{**}(Q)$ и эмпирической $F^*(Q)$ функций распределения.

Эти и некоторые другие известные критерии согласия в гидрологии не всегда правильно трактуются и используются.

ГЛАВА 8
О ПРИКЛАДНОЙ ГИДРОЛОГИИ

8.1. Общие положения

Прикладная гидрология — это целеустремленно организованная в соответствии с утилитарными требованиями развивающегося человеческого общества система гидрологических сведений и методологий, направленных на решение разного рода возникающих проблем и задач.

Специалисты, работающие в области хозяйственного, строительного и экологического проектирования, в сфере охраны окружающей среды и использования водных ресурсов, в службах гидрологического прогнозирования и защиты от опасных гидрологических явлений, естественно, должны использовать научные основы и новейшие результаты фундаментальной гидрологии. И если развитие прикладной гидрологии всячески стимулируется водохозяйственными и проектными организациями, то положение дел в фундаментальной гидрологии зависит от государственных структур управления наукой, а точнее, от мудрости и профессионализма лиц, принимающих решения в этой сфере и на этом уровне.

Недостаточно удачные решения неизбежно приводят к тому, что фундаментальная наука оказывается не готовой своевременно передать прикладной необходимые ей результаты и технологии. С другой стороны, служители прикладной гидрологии не всегда способны быстро воспринимать достижения фундаментальной из-за присущего им определенного консерватизма.

Два отличных друг от друга по своим целевым функциям основных традиционных направления прикладной гидрологии, которые, безусловно, сохранят, а возможно и увеличат, свое значение и в будущем, — это расчеты и прогнозы стока и других гидрологических явлений.

Курсы прикладной гидрологии или этих ее двух главных разделов обычно представляют достаточно обширное переложение основ фундаментальной гидрологии с добавлением конкретных рекомендаций и других, уже полностью прикладных, аспектов.

Важно помнить, что неизбежно возникают новые практические проблемы, и вследствие этого появляются новые аспекты и в прикладной геологии. Лучше предвидеть эти аспекты и быть готовыми к их решению.

8.2. Инженерная гидрология: гидрологические расчеты

Гидрографы стока в замыкающем створе — наиболее полная форма представления информации о режиме стока данной реки. Склонность к упрощению, иногда вынужденному, а иногда просто удобному, сподвигла гидрологов на введение представления о «характеристиках стока» как носителях обобщенной информации о гидрографах стока. Такими характеристиками являются: суточные, декадные, месячные, годовые, максимальные и минимальные расходы воды, наносов, химических веществ. С ними гораздо проще иметь дело в виде таблиц и упрощенных зависимостей. Иногда используются средние расходы или объемы за периоды, определения которых являются размытыми (половодье, паводок, межень), что немедленно влечет за собой разного рода неопределенности.

Характеристики стока легко могут быть подвержены статистическому анализу, и их кривые распределения вероятностей являются основной традиционной формой представления результатов гидрологических расчетов. Обычно выделялись методы построения кривых распределения характеристик стока при наличии, неполноте или отсутствии данных наблюдений. В настоящее время многие склоняются к мнению, что такое разделение методических подходов из-за проявления нестационарности рядов наблюдений теряет свой первоначальный смысл. Интересно, что именно недостаточность наблюдений всегда вызывает к жизни более сложные и интересные для фундаментальной гидрологии методы и подходы.

Примером крайней некорректности и искусственности является традиционная постановка задачи о внутригодовом распределении стока. Неопределенности, вводимые в решение данной задачи, связаны с желанием совместить выделение сезонных, месячных или других «внутригодовых элементов» стока с некоторым вероятностным оформлением, что делается чаще всего или очень условно, или просто неверно.

Предметом беспокойства гидрологов-прикладников всегда являлись два конца кривых распределения, связанных с проблемами недостаточности (засухи, маловодье) или чрезмерности (паводки, наводнения) поступающей с речного бассейна воды.

В Советском Союзе и затем в России гидрологи всегда имели склонность к созданию строгих «норм и правил» ведения гидрологических расчетов для нужд строительного проектирования. Позиция американских гидрологов всегда была более гибкой, но зато и менее определенной: «попытки строгой стандартизации могут уменьшить рентабельность отдельных сооружений, отсюда каждый проект должен составляться на основе индивидуального

учета местных условий и требований производства» (Р. К. Линслей, М. А. Колер, Д. Л. Х. Паулюс. Прикладная гидрология. Л., 1962). Где же лежит истина? Единые правила способны в какой-то мере компенсировать недостаточность профессионализма отдельных гидрологов-проектировщиков. Но, с другой стороны, возможная ограниченность авторов единой и обязательной методики способна ввергнуть прикладников в полном составе в пучину безысходности.

Среди главных неиспользованных возможностей системы гидрологических расчетов в первую очередь следует назвать множество гидрографов стока (наблюденных или смоделированных), которые во многих случаях способны дать полноценную и исчерпывающую информацию, будучи алгоритмически сопоставленными с требованиями практических прикладных задач.

8.3. Оперативная гидрология: гидрологические прогнозы

Состояние речных бассейнов на дату прогнозирования — основа прогноза. Другими словами, весь возможный детерминизм, связанный с наземными процессами гидрологического цикла, запечатлен в конкретности переменных состояния математических моделей формирования стока на названную дату. А дальше уже могут следовать различные варианты учета погоды за период заблаговременности прогноза. Это, в зависимости от выбора гидролога-прогнозиста, может привести и к вероятностным прогнозам, т. е. к предсказанию условных кривых распределения прогнозируемых величин при знании текущих состояний бассейнов, и к прямому использованию метеорологических прогнозов в рамках детерминированной схемы.

Из неиспользованных возможностей можно было бы рекомендовать ввести в практику «сверхкраткосрочные» прогнозы (десятки минут, часы), касающиеся опасных гидрологических явлений (ливневых и прорывных паводков, селевых потоков, снежных лавин), основанных не только на использовании моделей самих природных явлений, но и на некоторой экстраполяции уже начавшихся гидрометеорологических процессов. Например, оправдываемость прогнозной экстраполяции конкретной, частично уже зарегистрированной, плювиограммы гораздо выше, чем просто краткосрочный количественный прогноз осадков. Выигранные у времени часы и даже минуты в условиях хорошо отлаженной службы слежения, прогнозирования и предупреждения при проявлении катастрофических гидрологических явлений могут спасти многие жизни.

Столь же важны и разработки «сверхдолгосрочных» прогнозов для учета планируемых или предполагаемых изменений климата и (или) ландшафтов. По сути дела, это некое совмещение проблем расчетов и прогнозов стока в условиях нестационарности динамики окружающей нас среды.

8.4. Решение проблем и задач, требующее участия гидрологов

Помимо двух основных традиционных разделов прикладной гидрологии существуют и другие, имеющие не менее важное значение и все более проявляющие себя. Их характеризуют комплексность и постепенно возрастающая сложность. Чаще всего они связаны с научным гидрологическим обоснованием разного рода мероприятий, например такими:

- структура и география сети гидрометеорологических наблюдений;
- ведение водного кадастра;
- структуры служб слежения, прогнозирования и предупреждения опасных гидрологических явлений: наводнений, прорывных паводков, селевых потоков, оползней, снежных лавин;
- проблема водных ресурсов;
- комплексное освоение речных бассейнов;
- проблема загрязнения территорий, речных бассейнов и стока;
- математические модели экосистем;
- проблема охраны окружающей среды;
- водохозяйственные решения и проекты;
- проблемы жизнеобеспечения;
- проблема взаимодействия речных и подземных вод;
- проблема гидрологических последствий изменения климата;
- проблема гидрологических последствий преобразования ландшафтов;
- проблема гидрологических последствий урбанизации и освоения территорий.

Решение большинства проблем и задач может одновременно или последовательно осуществляться на глобальном, региональном и территориальном (в рамках государственных и административных границ) уровнях. Для ряда перечисленных задач существуют традиционные подходы, достаточные и недостаточные. Многие же по-настоящему еще не осмыслены и не имеют четко разработанных основ своих решений.

ГЛАВА 9
ПРОШЛОЕ И БУДУЩЕЕ ГИДРОЛОГИИ

9.1. Взгляд в прошлое

Гидрологию, которую большинство ее служителей воспринимают на данном этапе как науку издавна привычную, установившуюся в своих подходах и методах, не нуждающуюся в каких-либо кардинальных переменах, уместно называть «традиционной гидрологией» в отличие от зарождающейся и грядущей «гидрологии нового поколения».

Итак, под традиционной гидрологией будем понимать науку, которая существовала и развивалась в XX в. Джеймс Дуг полагает, что последний отмечен появлением научной гидрологии и расчленяет его в отношении ее развития на четыре периода: эмпиризма (1900—1930), рационализации (1930—1950), теоретизации (1950—1975) и компьютеризации (1975—2000). Главное разочарование Дуг испытал в связи с неудачей исследований в области реакции речных бассейнов (catchment response) на метеорологическое воздействие и объединения детерминированных и стохастических методов (James C. I. Dooge. The Emergence of Scientific Hydrology in the Twentieth Century, Advances in Water Science, Core Journal of China. 1999).

Первые признаки зарождения гидрологии нового поколения были заметны уже в 70-е годы XX в., однако ожидаемый прорыв по разным причинам так и не произошел. Что помешало и что мешает гидрологии нового поколения развиваться и крепнуть? Да то же, что и обычно — сопротивление носителей старой традиционной парадигмы. Реально это достигается самыми разнообразными способами, чаще всего в рамках даже не осознанной «мешающей» стратегии.

Способы эти стары как мир. Перечислим основные из них:

- отрицаются под разными предлогами сами подходы «нового поколения»;
- выражается согласие с этими подходами, но подчеркиваются многочисленные трудности и выражается мнение (на самом деле тайная надежда), что славное время этих подходов еще наступит не так скоро;
- подходы «нового поколения» дискредитируются гидрологами, воспринимающими «новизну» только на словах;

• подготовка будущих гидрологов часто находится в руках сторонников традиционной гидрологии.

Однако всегда следует помнить, что именно традиционная гидрология заложила основы для зарождения своей преемницы — гидрологии нового поколения. Последняя где-то в отдаленном будущем видимо получит иное наименование, например, гидрология эпохи примитивных моделей. Сейчас же мы попытаемся ретроспективно охарактеризовать, а это оказывается не так уж и просто, основные черты уходящей традиционной гидрологии.

Вырисовываются три основных аспекта проявления ее характерных особенностей. Первый, обычно освещаемый в учебниках и монографиях по общей гидрологии и тематически, но не по существу, остающийся неизменным и в грядущую эпоху гидрологии нового поколения, — это описание объектов и процессов, относящихся к области интересов гидрологии как таковой. Среди этих объектов в первую очередь должны быть названы реки и речные бассейны, эстуарии и дельты, озера, болота, ледники, почвенные и подземные воды. Среди процессов — выпадение осадков, испарение, формирование стока, ледовые явления, русловые процессы, эрозия и движение наносов.

Второй аспект связан с почти обязательным набором разделов в книгах по учению о стоке. Поскольку соответствующие государственные службы всегда предпочитали поступать прагматично и проводить наблюдения не за всей цепью гидрометеорологических событий, а в основном за итогом наземной части гидрологического цикла — расходами воды в реках, то естественным следствием этого факта явилось то, что именно материалы этих наблюдений и легли в основу гидрологических выводов и строительного проектирования. А дальше возникло искушение только ими и обойтись. Видимо, именно эти факты послужили основанием для традиционного выделения достаточно очевидных обобщающих характеристик стока — нормы годового (среднего многолетнего) стока, его изменчивости от года к году, его экстремумов (максимального стока дождевых паводков и весенних половодий, минимального меженного стока), его внутригодового распределения. Для описания этих характеристик обычно использовались методы математической статистики, иногда обоснованно, а иногда и нет.

И наконец, третий аспект определился набором методологических приемов, позволяющих говорить о сложившейся парадигме традиционной гидрологии. Многие из этих приемов останутся на службе гидрологии нового поколения. Но большинство из них все же отойдут в прошлое. Ниже перечислим некоторые характерные для традиционной гидрологии приемы и подходы, которые, с нашей точки зрения, тормозили развитие научной гидрологии и от которых следует освободиться.

1. Изучение не столько процессов формирования стока, сколько соотношений между суммарными или осредненными за различные отрезки времени характеристиками стока и факторами, их вызывающими.

2. Несоответствие между многочисленными описаниями и рассуждениями, с одной стороны, и примитивными математическими средствами, с другой.

3. Ограничение числа аргументов (обычно не более двух-трех) при построении разного рода зависимостей.

4. Неудачное применение такого показателя, как коэффициент стока, который столь же изменчив, как и сам сток, для регламентации стокоформирующих свойств водосборов.

5. Использование разного рода поправок к оценкам стока, учитывающих местные условия или другие особенности речных бассейнов.

6. Учет озерности, заболоченности, залесенности введением соответствующих коэффициентов влияния.

7. Чрезмерно упрощенные идеализации некоторых природных явлений и процессов; примером такой идеализации может служить неадекватная схема стекания сплошного слоя воды по гладкому плоскому склону вместо сложных последовательных процессов накопления воды в стоковых элементах, ее истечения и микроручейкового стекания в русловую сеть.

8. Преклонение перед непреложными истинами некоторых уравнений математической физики и их использование, невзирая на неадекватность описываемых природных процессов.

9. Применение временных и пространственных, так называемых редукционных кривых, имеющих очевидный математический смысл, но лишенных всякого физического обоснования.

10. Использование принципиально некорректных методов расчленения гидрографов стока при анализе источников питания рек.

11. Дезинтеграция единого процесса формирования стока на отдельные разделы — дождевой, снеговой, ледниковый, подземный; при этом очевидная проблема смешанного стока тщательно обходилась.

12. Параллельное и вроде бы независимое существование таких разделов гидрологии, как минимальный и подземный стоки.

13. Искусственность разделения стока по фазам водного режима (половодье, паводки, межень).

14. Формализованная схематизация гидрографов стока.

15. Не всегда обоснованное картирование разного рода гидрологических показателей.

16. Злоупотребление «районированием» и «классификациями» как акциями всегда произвольными, условными и неопределенными. Не можем не сослаться на следующие строки: «поскольку весь процесс классификации производится мысленно, мы можем

выполнять его независимо от того, существует ли в действительности предмет, обладающий данной особенностью, или нет» (Льюис Кэролл. Символическая логика. М., 1973).

17. Использование так называемых методов водного и теплового баланса, развившихся в силу слабости теории на базе законов сохранения вещества и энергии, особенно если это касается оценки одной из составляющих баланса как остаточного члена.

18. Расслоение методов гидрологических расчетов и прогнозов.

19. Разделение методов гидрологических расчетов на две категории — при наличии и при отсутствии данных наблюдений.

20. Использование аппарата математической статистики (в основном регрессий и корреляций) при решений задач, не требующих вероятностных подходов и оценок.

21. Выделение большой группы гидрологических задач, в решении которых статистическим методам предоставлялась полная независимость, отчего имело место увлечение некоторыми возможностями последних без глубокого понимания сущности совершаемого.

В настоящее время диагностировать присутствие в гидрологии новой парадигмы, а также констатировать пусть временный, но успех исследований в рамках традиционной гидрологии пока невозможно. Гидрология как бы замерла в своем развитии. Сугубо российская причина — это практически полное прекращение финансирования гидрологии и наук о Земле, использование немногих выделяемых средств не по назначению. За рубежом все происходит по-другому, но почти с тем же эффектом. Подлинная наука несовместима с азартной погоней за грантами. Последние, по вполне понятным причинам, чаще всего выигрывают вовсе не те, кто может решить научные проблемы наилучшим образом. Еще в 1918 г. М. Вебер в своем докладе «Наука как призвание и профессия», прочитанном в Мюнхенском университете, уже утверждал: «В науке совершенно определенно не является «личностью» тот, кто сам выходит на сцену как импресарио того дела, которому он должен был бы посвятить себя...». Таким образом, выход на сцену гидрологии нового поколения задержался в первую очередь вследствие заторможенного развития гидрологической науки вообще.

Существует еще одна, неизбежная и поэтому постоянная, проблема, характерная, по крайней мере, для периода традиционной гидрологии, — это разобщенность гидрологического сообщества, рассредоточившегося по разным «углам» гидрологической науки, как следствие ее дезинтеграции. А это неизбежно привело к почти бесполезной тривиальной деятельности. Ганс Селье в своей книге «От мечты к открытию» (М., 1987) с примечательным подзаголовком «Как стать ученым» предостерегал: «не смешивайте важность ваших целей...со значимостью вашей работы».

К сожалению, понимание сферы науки, которая еще частично сохранилась в сознании широкой общественности, не соответствует истинному положению вещей. «Процесс развития науки описывается как милая волшебная сказка, однако ...этот процесс гораздо более случаен и хаотичен, он настолько же подвержен влиянию моды и страстей, насколько следует из логики и измерений. Аргументы часто игнорируются, точки зрения искажаются...» (Д. Фишер. Рождение Земли. М., 1990). Следует пока учитывать горькую реальность и признать практическую невозможность сосредоточить и организовать лучшие умы гидрологического мира на главных проблемах развития гидрологии нового поколения.

Положение в гидрологии на рубеже XX и XXI вв.

Для того чтобы двигаться вперед, иногда полезно вылезти из своей профессиональной «ямы» и оглядеться. Мы пользуемся образными изобразительными средствами Эдварда де Боно (Рождение новой идеи. М., 1976).

«... Специалисты обычно счастливо обитают на дне самых глубоких «ям», настолько глубоких, что, по-видимому, вряд ли стоит вызволять их оттуда, чтобы они осмотрелись по сторонам».

«... Гораздо легче расширить старую яму, чем начинать рыть новую».

Де Боно противопоставил два характерных для ученого мира образа размышлений — шаблонного (путь наивысшей вероятности, путь большинства) и нешаблонного (нацеленного на новые идеи). В мире науки много добросовестных ученых, умеющих логически мыслить. Но они лишены способности выдвинуть новую идею. «Страшно подумать, сколько новых идей покоится в уже собранной информации, организованной в настоящее время одним-единственным образом, в то время как существует масса возможностей организовать их гораздо лучше». «...Как подсчитать число исчезнувших идей, навсегда потерянных для человечества?».

Шаблонное мышление — это углубление одной и той же ямы, нешаблонное — попытка копать где-то в другом месте. «Идеал, которого стремится достичь нешаблонное мышление, — это простота при крайней утонченности, простота самой идеи, весьма эффективной в действии и весьма простой по форме. Это простота богатства, но не скудности, изобилия, но не голода. Природу нешаблонного мышления гораздо лучше поймет всякий, обладающий достаточно развитым чувством юмора».

Вит Клемеш, будучи одним из немногих гидрологов, сумевших окинуть острым критическим взглядом состояние дел в своей науке, чему, несомненно, способствовала его деятельность на посту президента IAHS (Международной Ассоциации гидрологической науки), дал своего рода социологическую оценку состояния гид-

рологического сообщества. И с этой оценкой трудно не согласиться. Мы даем здесь краткий тезисный пересказ впечатлений Клемеша о драматичном положении дел в гидрологии.

Дилетантизм в гидрологии: переходное состояние или неизбежность?

На базе порочной тройственности благих стремлений, невежества и скоропалительности решений построена вся научная система, и гидрологически неверные концепции становятся, в сущности, непреодолимым препятствием прогресса в гидрологии.

Гидрологи обычно не видят различий между гидрологией и управлением водными ресурсами, между гидрологией и статистикой, между гидрологией и математическим подбором кривой, между фактами и расчетами и, как результат, между гидрологическими концепциями и ошибочными представлениями.

Процесс становления гидрологии труден, ибо, с одной стороны, она не имеет четко сформулированной научной основы, а с другой — формирование такой основы связано с трудностями объединения гидрологических фрагментов. Результат этого порочного круга — застой. Различные не гидрологические предпосылки, из которых исходят гидрологи, не дают перестроить линию этого круга и заменить индивидуальные перспективы в различных областях гидрологии в общую гидрологическую перспективу всей дисциплины или даже только увидеть разницу между этими двумя перспективами.

Неудовлетворительность такого status quo усиливается сепаратистскими интересами организаций управления водными ресурсами, которые проводят свою политику поддержки гидрологических исследований, часто поощряя посредственность и препятствуя проявлению нового.

Истинный прогресс в гидрологии может подорвать институты управления водными ресурсами, раскрывая жалкую научную основу их прошлых проектов.

Результирующие неверные концепции затем трудно искоренить, так как они часто используются как стандарты, которыми измеряется прогресс. Гидрология переживает переходный период. Неизбежность переходного состояния порождает неизбежность дилетантизма. Но существует опасность, что переходное состояние никогда не закончится, а дилетантизм станет нормой. Для предотвращения этого гидрологическое сообщество должно осознать ситуацию и начать создавать свою дисциплину серьезно.

Наиболее важным из всего сказанного является необходимость осознания того, что заниматься чем-нибудь гидрологическим не означает, что это обязательно способствует созиданию гидрологии. Без понимания этого гидрологи не смогут излечиться от существующего дилетантизма.

Гидрологические перспективы?

Гидрология больше рассматривается как технология, чем как наука. Эта позиция указывает на очень низкий уровень гидрологии, что, в свою очередь, привело к очень несовершенной технологии в прикладных дисциплинах.

Три четверти всех работ, сделанных под вывеской гидрологии, включая исследования, учебники, руководства, университетские курсы, не содержат гидрологии вообще. Это недопустимая смесь попыток решить прикладные вопросы, связанные с гидрологией, при отсутствии гидрологических знаний.

Большое количество бесплодных исследований в гидрологии было сделано из-за попыток найти быстрое решение проблем управления водой.

Почему гидрологи не отказываются отвечать на запросы, которые явно не выполнимы? Обычный ответ: они пытаются сделать лучшее из того, что может быть сделано в данной ситуации. В ретроспективе видно, что это привело к большим ошибкам.

Почему гидрологи не восстают? Главная причина: у многих из них нет каких-либо особых чувств к гидрологии и они очень легко соблазняются выполнением технических пируэтов. Большинство гидрологов в своей душе являются технологами.

Типично, что имидж исследовательским работам в области гидрологии создает технологический, а не научный уровень исполнения.

Опасности от плохой технологии растут пропорционально степени псевдонаучности ее содержания.

Гидрологи еще не поднялись до должного уровня объяснения редких явлений и решения головоломок природы. Включение в планы и проекты попыток анализа тупиковых вопросов круговорота воды в природе считается едва ли неприличным.

Предложена следующая программа выхода из создавшегося положения:

1. Создать «критическую массу» гидрологов-ученых и гидрологов-прикладников, которые понимают разницу между наукой и технологией.

2. Необходимо, чтобы эта «критическая масса» действовала сообща и не позволяла подавить себя близорукому большинству, в том числе и с проявлением административной власти; важно, чтобы информация от «критической массы» «наверх» по дороге не выхолащивалась.

3. Переустроить гидрологическое образование и обучение основам гидрологии специалистов других отраслей знания.

4. Необходимо поднять уровень гидрологических публикаций и сделать IAHS катализатором необходимых изменений в гидрологии.

Что гидрологи должны понимать?

Гидрологи часто не отдают себе отчета, что многое из того, что они изучали, — вовсе не гидрология, хотя и находилось в гидрологических курсах и учебниках.

Несмотря на то, что практические проблемы регулирования вод привели к рождению гидрологии, в настоящее время они тормозят ее развитие.

Значительная часть гидрологов-практиков рассматривает гидрологию не как одну из наук о Земле, а как совокупность технологий превращения гидрологических данных в информацию для планирования, разработки и управления гидравлическими структурами и системами водных ресурсов.

Ситуация усугублена еще одним обстоятельством. Гидрологию часто смешивали с «управлением водными ресурсами». В результате возникла объединенная псевдодисциплина, которая часто интерпретируется как союз между теоретическим и прикладным аспектами гидрологии. Это неверно в принципе, так как здесь мы имеем не одну, а две фундаментально различные дисциплины: гидрологию как науку о Земле и управление водными ресурсами как науку о принятии решений. Такое положение вещей дорого обошлось гидрологии, поскольку многие «would-be hydrologists» (воображающие себя гидрологами) были увлечены другим, математически более соблазнительным аспектом, продолжая думать, что они занимаются гидрологией. Типичным примером является развитие «стохастической гидрологии», которая изначально была задумана только как инструмент готовых решений без всяких гидрологических претензий.

Еще одним наследием прошлого для гидрологии является широко распространенный подход к ней как к упрощенной или вульгаризированной механике жидкости или гидравлике.

Большинство учебников, на которых выросло нынешнее поколение гидрологов, не были учебниками по науке «гидрология». Следовательно, невозможно ожидать, что научная точка зрения в гидрологии будет преобладающей. Гидрологи часто узнают что-нибудь о гидрологии вопреки, а не благодаря лекциям и учебникам. Можем ли мы признать, что чего-то не знаем, если каждый учебник переполнен методами, технологиями и моделями для решения почти любой представимой гидрологической задачи.

Степень нашего невежества — не причина того, что мы столь многого не знаем. Главная причина состоит в том, что наша способность интересоваться изучением природы в настоящее время подавлена интересом к технологии и практическим реализациям. Нет гидрологов, которые занимались бы исследованиями, ведущимися из любознательности.

Диагноз Клемеша о фатальности дуализма гидрологии как науки о Земле и как специфического источника информации и технологий, обслуживающего водохозяйственную сферу экономики, безусловно, правилен. Однако понимание последствий такого положения вещей гидрологическим сообществом в полной мере пока еще не достигнуто.

9.2. Взгляд в будущее

Настало наконец время сделать попытку изложить свою версию — какой же нам представляется эта «гидрология нового поколения», гидрология будущего. Говорить о последней, так же как и о будущем науки, вообще и не скатиться в наезженную колею тривиальностей, безответственных высказываний и общих фраз почти невозможно. И все же! Давайте попытаемся порассуждать.

* * *

Начнем с вопроса: от чего в основном зависело и зависит развитие науки в целом и ее отдельных отраслей, в том числе гидрологии? Отвечаем, как нам кажется, в порядке значимости: от количества духовно и интеллектуально подготовленных и наукоориентированных личностей в людском сообществе, социуме; от нравственного и экономического состояния социума; от характера и интенсивности обращений социума к развивающейся науке. Каким-то почти непостижимым образом все три названные причины тесно связаны между собой. Мы здесь не вступаем в бесполезную дискуссию о том, как отличить действительно наукоориентированных личностей от тех, кто бездарно или более тонко, но только играет эту роль. Не обсуждаем и стратегию приведения социума в состояние, когда он будет способен воссоздавать корпус принимающих решения лиц, в свою очередь способных задавать науке настоящие вопросы и, главное, различать качество ответов. И, вполне сознательно, не поднимаем многих напрашивающихся проблем, где все мы — не более чем дилетанты.

То, что сейчас происходит в гидрологии, еще долго будет оставаться в таком же состоянии. Инерционность науки все-таки огромна. И эта инерционность зависит не столько от самой науки, сколько от социума, его духовного, нравственного, интеллектуального и экономического состояния. Наука — это осознанный опыт человечества. И этот опыт должно приобретать упорно, последовательно, неукоснительно. Болезни и патологии, филии и фобии неизбежно переносятся в научный мир. Практически пока еще несуществующая социология науки должна была бы предупре-

дить лиц, принимающих решения, о пагубности существующей практики распределения сил и средств на поддержание развития науки. Какие общественные и государственные силы могут быть приведены в действие для ликвидации возможности существования мощной всепоглощающей оболочки околонаучных структур, порождающих слой ученых, равнодушных к своей науке и составляющих чуть ли не большинство всех комиссий и ученых советов? То, что мы могли бы предложить, — или неосуществимо, или же неэффективно, или даже безнравственно. Но пока нарисованная ситуация не изменится, равнодушные будут продолжать порождать равнодушных, тормозя развитие науки.

* * *

Что может привести к порождению новой парадигмы в гидрологии? Какие силы в этом участвуют? Если говорить о глубинных, то они всегда одни и те же — любовь к природе, жажда познания, неудовлетворенность достигнутым. Если же иметь в виду внешние воздействия, то — это постоянная требовательность социума и некоторые «великие импульсы», порождаемые отдельными достижениями науки и техники. Таким импульсом оказалось появление компьютера. Перед гидрологией открылись принципиально новые горизонты. Перспективы казались гигантскими. Исчезла зависимость от объема производимых вычислений. Возникла недоступная ранее возможность, не оглядываясь на сложность и «громоздкость» расчетов, математически описать гидрологические процессы и явления с любой необходимой степенью подробности.

В то же время, пример с компьютеризацией гидрологии потрясает. Компьютер почти не изменил нашей идеологии при описании природных процессов. Наоборот, он, эффективно разрешая некоторые численные схемы, закрепил неадекватные или почти неадекватные природе подходы, иногда, по сути дела, возвратил их к жизни. Своими «пакетами» он не столько помог инженерам и ученым, сколько позволил им перестать размышлять о сущности проводимых вычислений. Он, безмерно увеличив наши вычислительные возможности, позволил нам захламить нашу гидрологию свалкой цифр, на самом деле никому не нужных. Особенно ярко это сказалось на стохастической гидрологии. Конечно, о «виновности» компьютера мы сказали здесь в символическом плане, а по-настоящему виноваты, конечно, сами гидрологи. Несмотря на все сказанное, именно компьютер стоит у истоков гидрологии нового поколения, у истоков адекватного физически обоснованного распределенного моделирования.

* * *

Чтобы не запутаться, введем обозначения сменяемым друг друга последовательным парадигмам:

A — соответствующая традиционной гидрологии XX в.;

B — отвечающая гидрологии нового поколения;

C — связанная с гидрологией нашего отдаленного будущего.

Парадигма *B* должна повсеместно возобладать над парадигмой *A* и постепенно утвердиться. Это должно проявиться в достижении подлинной адекватности наших моделирующих систем природе; в разрешении проблемы масштаба; в правильной интерпретации пространственной гетерогенности многих свойств почвенно-растительного покрова, по логике вещей становящихся параметрами моделей; в создании работоспособных стохастических моделей погоды, обеспечивающих вход детерминированных моделирующих систем; в прозрачности детерминированно-стохастического моделирования гидрологических характеристик.

Затем гидрология должна перейти в состояние нормальной науки, тем самым перестать быть гидрологией нового поколения (это название приемлемо лишь в переходный период). Общая картина нормальной гидрологии этого времени, по-видимому, будет такова: усовершенствование и «разукрашивание» моделирующих систем, отвечающих новой доминирующей парадигме; пропускание через «модельные фильтры» данных всех водно-балансовых станций, экспериментальных и репрезентативных водосборов мира, многих малых, средних и больших речных бассейнов; обобщение и географическая систематизация физически обоснованных параметров моделей; появление широких обобщающих работ и учебников по новой гидрологии.

И какой мы с вами попросим для этого срок? Мы полагаем, что не менее 50 лет, может быть немного больше.

* * *

Появление парадигмы *C*, которая должна прийти на смену парадигме *B*, будет связано не столько с завершением цикла нормальной гидрологии в рамках этой последней парадигмы, сколько с появлением и утверждением нового великого импульса в гидрологии и других науках о Земле.

Таким импульсом, с нашей точки зрения, будет резкое изменение системы гидрометеорологических наблюдений. Первой особенностью новой системы будет использование в ней, по крайней мере, трех важнейших принципиально новых приборов и установок, которые совершат переворот в гидрометеорологической фундаментальной и прикладной науке. Перечислим их:

1) автоматический осадкомер, регистрирующий интенсивность и слой жидких и твердых осадков за короткие интервалы времени в пределах определенного контура (площадью 100—1 000 м^2) и работающий на основе влияния выпадающих осадков на некое непрерывно измеряемое физическое поле;

2) автоматический измеритель восходящего (испарение и транспирация) или нисходящего (конденсация) потока воды в газообразном состоянии в пределах определенного контура (площадью около 100 м^2), основанный на одном из возможных принципов регистрации прохождения молекул воды через названный контур;

3) автоматический расходомер, ведущий непрерывную запись расходов воды и взвешенных и влекомых наносов в необорудованном створе, минуя традиционный подход «скорость — площадь» и основанный на существовании однозначной (скорее всего нелинейной) зависимости между расходом и создаваемым им регистрируемым воздействием на обстановку в районе створа (сейсмика, магнетизм, гравитация и др.) или на соответствующее специально создаваемое физическое поле.

Второй особенностью этой системы будет совершенно иное разрешение наблюдаемых гидрометеорологических полей во времени и пространстве. Это касается и традиционных, и новых способов измерений. Если сейчас для массового моделирования формирования стока, осуществляемого по стандартным данным наблюдений сети метеорологических станций, редко используют расчетный интервал времени короче суточного, то будущее, скорее всего, будет представлено наблюдениями с интервалами суммирования или осреднения от 10 до 60 мин. Если сейчас расстояние между осадкомерными пунктами на территории суши можно оценить в среднем в 30 км, то в будущем это, очевидно, будут 10 или 20 км.

Что касается других гидрометеорологических элементов, то шаг между точками наблюдений видимо уменьшится незначительно. Скорее всего будет увеличено число высокогорных пунктов наблюдений, особенно в местах ярко выраженных гипсометрических контрастов. Количество гидрометрических створов в мире видимо возрастет в 2—3 раза, в основном за счет еще слабо освоенных в этом смысле речных бассейнов. Допускаем и возможность исчезновения метеорологических и гидрологических станций как таковых и появления иных форм измерений. И наконец, еще одна важная особенность этого времени — существенное повышение точности самих измерений.

Важнейшим следствием этих основных особенностей новой системы наблюдений будет совершенно иная степень подробности математического описания процессов формирования стока и других гидрологических явлений.

Особым событием в будущей жизни гидрологии может стать наш прорыв в мир подземных вод. Обидно, но мы не можем привести каких-либо реальных доводов в подтверждение сказанного, хотя рано или поздно в той или иной мере это должно будет случиться. Может быть под воздействием пока не предполагаемого нами импульса.

Широкие перспективы перед гидрологией будущего, несомненно, откроются в связи с приходом принципиально новых возможностей дистанционных методов измерения всего того, что так необходимо гидрологам, но пока остается недоступным.

Здесь бы нам и остановиться. Но мы были бы неправы, если бы не поделились своими некоторыми не вполне научными ощущениями.

Все-таки наше прогнозирование перспектив науки, в данном случае гидрологии, — это всего-навсего перенос в будущее несколько приукрашенной современной ситуации, хотя и с возможными неожиданностями. Но за всем этим будущее может нам преподнести и «сюрпризы». Посмотрите внимательно: даже только гидрологические события последних лет наводят на серьезные и глубокие размышления. Катастрофы множатся и, по большому счету, истинные причины этого остаются не очень известными. Достаточным ли может оказаться предсказание потери спасительного для статистической гидрологии принципа стационарности гидрологических процессов с его устойчивыми расчетными вероятностями гидрологических величин в практике строительного проектирования? Конечно и одно это уже большое бедствие для инженерной гидрологии, ибо привычными подходами в условиях большой неопределенности и полного отсутствия информации здесь уже не отделаешься.

Что ж, эта вырисовывающаяся гидрология будущего принесет с собой новые теории, новые модели и новую парадигму (парадигму *C*). Но исходной базой для них будет уже не традиционная гидрология со своей парадигмой *A*, а та, которая в этой книге названа гидрологией нового поколения (парадигма *B*).

Возможно, что нормальная гидрология времен парадигмы *C* будет иметь место на рубеже XXI и XXII вв. Но это очень оптимистический прогноз.

9.3. Обращение к молодым гидрологам

Обращаемся к вам, молодые люди, пришедшие в гидрологию. Это очень интересная и достойная наука, приносящая обществу и государству великую пользу. Последняя могла бы быть многократно больше, если бы не разного рода помехи, возникновение которых присуще как самому ученому миру, так и соответствующим государственным структурам, от которых зависит развитие науки и ее наиболее эффективное использование на пользу России.

Как привить интерес к гидрологии молодым энтузиастам и этим заложить основы будущего нашей науки? Как сделать молодых гидрологов неравнодушными к ней людьми и подлинными профессионалами своего дела?

Самое лучшее решение проблемы образования, особенно на магистерском и аспирантском уровнях — это установление личной связи ученика и наставника, когда первый участвует в конкретной научной работе, обсуждении идей и погружается в размышления о путях решения гидрологических проблем. Это уже то, чему нельзя научиться, просто отсидев лекции.

А далее мы вынуждены произнести горькие слова, хотя вообще-то это и не принято. Но дела обстоят таким образом, что сокрытие правды способно только усугубить и без того непростую ситуацию. Каждому времени соответствуют свои достижения и трудности. Следует признать, что сейчас мы дожили до такого момента, когда планомерное развитие науки почти приостановлено, и стало стремительно расти количество ученых, дипломатично названных нами выше равнодушными. Это не только печальное, но и общественно опасное явление, ибо последние, руководя аспирантами и соискателями, неизбежно стремятся лепить своих учеников по своему образу и подобию. Что же делать в таких условиях молодому специалисту, честно желающему испробовать свои силы в лоне той науки, которую он себе выбрал? Как он сможет отличить настоящего наставника или хотя бы просто доброго советчика от лжеучителя?

Выбор наставника и руководителя в науке — в конечном счете дело сугубо личное, но молодые люди часто руководствуются при этом не всегда достойными мотивами или же предоставляют решение стечению обстоятельств. В то же время — это проблема не простая, требующая благоразумия и осторожности. И, безусловно, перед выбором следует тщательно ознакомиться как с положением дел в гидрологии вообще, так и с научными работами своего потенциального руководителя и его возможных, в ваших глазах, «соперников». Однако такую в общем-то не очень простую работу не каждый захочет проделать, но в этом случае молодой человек уже сам несет ответственность за все изъяны дальнейшей линии своей научной жизни. И не будьте «лжеучениками». Ну а мы еще рассчитываем на то, что прочтение или, на худой конец, ознакомление с этой книгой, возможно, поможет вам не впасть во многие заблуждения.

Все сказанное значимо не только для будущих ученых-гидрологов, но и гидрологов-инженеров, гидрологов-сетевиков, гидрологов-прогнозистов, гидрологов-экспедиционников, а также руководителей и менеджеров в области гидрологии.

Итак, научитесь различать ученых настоящих и мнимых. Не пугайтесь, если мы скажем вам, что последних сейчас предостаточно. Это одна из сторон современного духовного и интеллектуального нездоровья нашего общества.

Но сильных духом все это не должно обескураживать. Наоборот.

В добрый путь!

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теперь, когда наши читатели уже достаточно хорошо осведомлены о том, что такое гидрология, можно указать на некоторые особенности этой книги.

«Современные проблемы гидрологии» — учебное пособие, вводящее читателя в круг проблем и вопросов современной гидрологии и обращающее его внимание на все основные грани этой науки. Будущий гидролог, ознакомившийся с этим курсом, должен уже некоторым образом ориентироваться в гидрологии и при необходимости иметь возможность сделать правильный выбор. Но это не «букварь по гидрологии», и мы стремились не прибегать к формально и излишне общим описаниям, а сразу перейти на достаточно серьезный уровень рассмотрения излагаемых проблем и вопросов. Мы позволили себе иногда обратить внимание на сложности и неясности, на отсутствие общности взглядов, иногда даже на свою неудовлетворенность сложившейся ситуацией. В общем, мы не старались скрыть от читателя своего отношения к обсуждавшемуся вопросу. Итак, назначение курса — ознакомление со сложным миром гидрологии и многоплановостью ее задач и приложений.

Относительно близки по назначению к данному учебному пособию известные учебники «Общая гидрология» и «Гидрология суши», в основном построенные по принципу пообъектного описания (реки, озера, болота, ледники, подземные воды). Если же обратиться к учебным пособиям, посвященным главному вопросу гидрологии — учению о стоке, то последнее обычно излагается не с естественных позиций цельности процесса стока и его единства, а наоборот, по искусственно созданным разделам, которые приобрели уже практически узаконенный статус: норма годового стока, его изменчивость, внутригодовое распределение, минимальный и максимальный сток. Современное гидрологическое моделирование уже практически освободило нас от этой, в свое время вынужденной, традиции, но в настоящее время уже мешающей более полноценным подходам.

Практически во всех учебных изданиях такого рода отсутствует очень важная часть — методология гидрологии. Главная содержательная часть современной гидрологии — математическое моделирование — обычно игнорируется. Проблема многочисленных опасных гидрологических явлений только обозначена.

В настоящее время гидрология, как и многие другие науки, испытывает определенный кризис. В частности в России, в которой «рыночные отношения» приняли настолько уродливую форму, что, вторгаясь в мир науки, они буквально растлевают ее служителей. Создаваемые вокруг гидрологии профессионально неподготовленные предпринимательские группы быстро приучили пользователей вместо лучших научных достижений довольствоваться суррогатами, облаченными в красочные одежды компьютерных украшательств. Фундаментальная же гидрология при попустительстве равнодушных к ней лиц, принимающих решения на любых уровнях, постепенно умирает. Многие государственные программы, например связанные с так называемыми экологическими проблемами или катастрофическими природными явлениями, заведомо обречены на неудачу, ибо при своем воплощении они не будут иметь подлинно научного и, в первую очередь, гидрологического, обоснования.

Все сказанное свидетельствует о насущной необходимости молодого пополнения содружества гидрологов, профессионально и морально готового поднимать свою науку из руин, осведомленного о причинах ее нынешнего незавидного положения и способного противопоставить общему разложению свои силы и волю.

Авторы надеются, что данное учебное пособие будет полезно при подготовке специалистов-гидрологов. С замечаниями и предложениями по совершенствованию его содержания можно обращаться по адресу: 199178, г. Санкт-Петербург, В.О., 10-я линия, д. 33/35, СПбГУ, факультет географии и геоэкологии, кафедра гидрологии суши или vinograd1950@mail.ru.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н. И.* Гидрофизика. — М.: Академия, 2006. — 171 с.

2. *Будаговский А. И.* Испарение почвенной влаги. — М.: Наука, 1964. — 244 с.

3. *Великанов М. А.* Гидрология суши. — Л.: Гидрометеоиздат, 1948. — 530 с.

4. *Виноградов Ю. Б.* Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 156 с.

5. *Виноградов Ю. Б.* Этюды о селевых потоках. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 144 с.

6. *Виноградов Ю. Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 312 с.

7. *Виссмен У.-мл.* Введение в гидрологию / У. Виссмен, Т. И. Харбаф, Д. У. Кнэпп. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979. — 471 с.

8. Гляциологический словарь / под ред. В. М. Котлякова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 528 с.

9. Грани гидрологии / под. ред. Дж. К. Родда. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 448 с.

10. Грани гидрологии / под. ред. Дж. К. Родда. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 536 с.

11. *Калинин Г. П.* Проблемы глобальной гидрологии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1968. — 378 с.

12. *Картвелишвили Н. А.* Стохастическая гидрология. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — 168 с.

13. *Корень В. И.* Математические модели в прогнозах речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат, 1991. — 200 с.

14. *Кучмент Л. С.* Формирование речного стока / Л. С. Кучмент, В. Н. Демидов, Ю. Г. Мотовилов. — М.: Наука, 1983. — 216 с.

15. *Линслей Р. К.* Прикладная гидрология / Р. К. Линслей, М. А. Колер, Д. Л. Х. Паулюс. — Л.: Гидрометеоиздат, 1962. — 760 с.

16. *Львович М. И.* Вода и жизнь. — М.: Мысль, 1986. — 256 с.

17. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. — Л.: Гидрометеоиздат, 1974. — 639 с.

18. *Михайлов В. Н.* Гидрология / В. Н. Михайлов, А. Д. Добровольский, С. А. Добролюбов. — М.: Высшая школа, 2005. — 464 с.

19. *Нежиховский Р. А.* Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. — Л.: Гидрометеоиздат, 1971. — 476 с.

20. *Огиевский А. В.* Гидрология суши. — М.: Сельхозгиз, 1952. — 516 с.

21. *Паттерсон У. С. Б.* Физика ледников. — М.: Мир, 1984. — 472 с.

22. *Раткович Д. Я.* Стохастические модели колебания составляющих водного баланса речного бассейна / Д. Я. Раткович, М. В. Болгов. — М.: Институт водных проблем РАН, 1977. — 263 с.

23. *Роде А. А.* Основы учения о почвенной влаге. — Л.: Гидрометеоиздат, 1965. — Т. 1. — 664 с.

24. *Роде А. А.* Основы учения о почвенной влаге. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — Т. 2. — 288 с.

25. *Хортон Р. Е.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. — М.: Иностранная литература, 1948. — 159 с.

26. *Чайлдс Э.* Физические основы гидрологии почв. — Л.: Гидрометеоиздат, 1973. — 428 с.

27. *Чеботарев А. И.* Гидрологический словарь. — Л.: Гидрометеоиздат, 1964. — 223 с.

28. *Чеботарев А. И.* Общая гидрология. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 544 с.

29. *Шульц В. Л.* Реки Средней Азии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1965. — 692 с.

30. *Shiklomanov I. A.*, *Rodda John C.*, ed-s, World Water Resources at the Beginning of the Twenty — First Century. International Hydrology Series. — Cambridge University Press, UNESCO, 2003. — 435 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава 1. **Общие сведения о гидрологии** 5

1.1. Вода на Земле 5
1.2. Уникальные свойства воды 6
1.3. Наука «Гидрология» 11
1.4. Разделы гидрологии 12
1.5. Гидрология в системе наук 15
1.6. Основные концепции гидрологии 16
1.7. Возможности гидрологии 20
1.8. О мировоззрении гидролога 21
1.9. О критическом начале в гидрологии 22
1.10. Предостережение 24

Глава 2. **Речной сток** 25

2.1. Природа явления 25
2.1.1. Общие положения 25
2.1.2. Гидрологический цикл 26
2.1.3. Процесс формирования стока 26
2.1.4. Речные бассейны 27
2.1.5. Виды питания рек 32
2.1.6. Почвенные воды и испарение 33
2.1.7. Подземные воды и подземный приток в реки 33
2.1.8. Законы сохранения и водный баланс 34
2.1.9. Режим, гидрографы и характеристики стока 36
2.1.10. Пространственные аспекты формирования стока 39
2.1.11. Движение воды по русловой сети 45
2.1.12. Сопутствующие явления 46
2.2. Речной сток на планете Земля 48
2.3. Сток и человек 52
2.3.1. Общие положения 52
2.3.2. Система наблюдений за осадками и стоком 52
2.3.3. Использование стока и проблема водных ресурсов 53
2.3.4. Антропогенные воздействия на сток 55

Глава 3. **Формирование стока и динамика воды в речном бассейне** 58

3.1. Проблема 58

3.2. Физические свойства воды, льда, снега, почвы, реголита и горных пород ... 61
3.2.1. Вода, лед и скальные горные породы ... 61
3.2.2. Многофазная дисперсная среда и ее теплофизические свойства ... 62
3.2.3. Физические и водно-физические свойства многофазной дисперсной среды ... 67
3.2.4. Вода в системе почва—реголит ... 72
3.2.5. Максимальная водоудерживающая способность снежного покрова ... 77
3.3. Процессы и явления на поверхности водосбора ... 78
3.3.1. Выпадение осадков ... 78
3.3.2. Обмен тепловой энергией поверхности бассейна с атмосферой и космическим пространством ... 79
3.3.3. Перехват осадков растительным покровом ... 80
3.3.4. Формирование снежного покрова ... 80
3.3.5. Снеготаяние и разрушение снежного покрова ... 81
3.3.6. Водоотдача из снега ... 82
3.3.7. Инфильтрация и формирование поверхностного стока ... 83
3.3.8. Поверхностное задержание ... 85
3.4. Процессы и явления в почве и приповерхностном слое земной коры ... 86
3.4.1. Динамика тепловой энергии ... 86
3.4.2. Динамика почвенных вод ... 88
3.4.3. Испарение ... 89
3.4.4. Особенности динамики воды в почве при неглубоком залегании уровня грунтовых вод ... 91
3.4.5. О подземных водах ... 92
3.5. Склоновая трансформация стока ... 93
3.5.1. Проблема ... 93
3.5.2. Концепция стоковых элементов ... 95
3.6. Русловая трансформация стока ... 99
3.6.1. Проблема ... 99
3.6.2. Феноменологическая концепция времени добегания ... 101
3.7. Соотношение стока и динамики воды в бассейне ... 102
3.8. Ландшафт — стокоформирующий комплекс ... 111
3.9. Особенности условий формирования стока в различных природных зонах ... 112
3.10. Выводы ... 114

Глава 4. **Эрозия и бассейновое загрязнение** ... 115

4.1. Проблема ... 115
4.2. Предпосылки ... 116
4.2.1. Эрозия ... 116
4.2.2. Загрязнение ... 118
4.3. Склоновая эрозия и судьба нерастворимого загрязнителя ... 119
4.4. Миграция растворимого загрязнителя вместе с водой ... 121

4.5. Перспективы изучения и моделирования процессов эрозии и бассейнового загрязнения ... 125

Глава 5. **Горная гидрология** ... 126
5.1. Проблема ... 126
5.2. Особенности формирования стока в горах ... 127
5.3. Пространственная интерполяция метеорологических величин в горных условиях ... 130
5.4. Ледники и ледниковый сток ... 134
5.4.1. Основные понятия и определения ... 134
5.4.2. Ледники на поверхности суши ... 140
5.4.3. Движение ледников ... 143
5.4.4. Ледниковый сток ... 149
5.5. Бедленды — территории особо активного поверхностного стока ... 150

Глава 6. **Опасные гидрологические явления** ... 156

6.1. Проблема ... 156
6.2. Наводнения ... 157
6.3. Прорывные паводки ... 158
6.3.1. Общие положения ... 158
6.3.2. Прорывы горных завалов ... 158
6.3.3. Прорывы озер, подпруженных ледниками ... 159
6.3.4. Прорывы внутриледниковых водоемов ... 164
6.3.5. Прорывы моренных озер ... 166
6.4. Волновые катастрофы ... 168
6.5. Селевые потоки ... 169
6.5.1. Проблема ... 169
6.5.2. Селевые очаги ... 171
6.5.3. Селевые процессы ... 174
6.5.4. Движение селевых потоков высокой плотности ... 179
6.5.5. Лахары ... 182
6.5.6. Сель идет! ... 182
6.6. Оползни, снежные лавины, снеговодные потоки ... 194
6.7. Катастрофические обломочные лавины ... 195
6.8. Гидрологические катастрофы на планете ... 202
6.9. Своими руками ... 208

Глава 7. **Методология гидрологии** ... 211

7.1. Некоторые общие методологические элементы ... 211
7.1.1. Общие положения ... 211
7.1.2. О математике в гидрологии ... 216
7.1.3. Теория в гидрологии ... 217
7.1.4. Существующие и несуществующие законы ... 221
7.1.5. Системный синдром ... 223
7.1.6. Наивный информационизм ... 226
7.2. Вода в трех «геосферах» и особенности описания ее динамики ... 228
7.3. Наблюдения и эксперименты в гидрологии ... 236

7.3.1. Общие положения ... 236
7.3.2. Пять разделов экспериментальной гидрологии ... 236
7.3.3. Исследования речных бассейнов ... 239
7.4. Математическое моделирование в гидрологии ... 246
7.4.1. Проблема ... 246
7.4.2. Противоречивость понятия «математическая модель» ... 249
7.4.3. Два принципиально различных класса математических моделей ... 250
7.4.4. Детерминированное моделирование ... 251
7.4.5. Стохастическое моделирование ... 273
7.4.6. Детерминированно-стохастическое моделирование ... 275
7.4.7. Перспективы моделирования речного стока ... 278
7.5. Математическая статистика в гидрологии ... 279
7.5.1. Общие положения ... 279
7.5.2. Основная задача математической статистики в гидрологии ... 283
7.5.3. Эмпирическая функция распределения ... 284
7.5.4. Аналитическая функция распределения ... 288
7.5.5. Оценка параметров аналитических функций распределения ... 290
7.5.6. Критерии согласия ... 292

Глава 8. **О прикладной гидрологии** ... 294

8.1. Общие положения ... 294
8.2. Инженерная гидрология: гидрологические расчеты ... 295
8.3. Оперативная гидрология: гидрологические прогнозы ... 296
8.4. Решение проблем и задач, требующее участия гидрологов ... 297

Глава 9. **Прошлое и будущее гидрологии** ... 298

9.1. Взгляд в прошлое ... 298
9.2. Взгляд в будущее ... 306
9.3. Обращение к молодым гидрологам ... 310

Заключение ... 312
Список литературы ... 314

Учебное издание

Виноградов Юрий Борисович,
Виноградова Татьяна Александровна

Современные проблемы гидрологии

Учебное пособие

Редактор *Т. Ф. Мельникова*
Технический редактор *Е. Ф. Коржуева*
Компьютерная верстка: *Г. Ю. Никитина*
Корректоры *А. П. Сизова*, *Е. И. Борисова*

Изд. № 101112455. Подписано в печать 25.05.2007. Формат 60×90/16. Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,0. Тираж 2 000 экз. Заказ № 25880.

Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953.Д.004796.07.04 от 20.07.2004.
117342, Москва, ул. Бутлерова, 17-Б, к. 360. Тел./факс: (495) 330-1092, 334-8337.

Отпечатано в ОАО «Саратовский полиграфкомбинат».
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59. www.sarpk.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИИ

ISBN 978-5-7695-3924-4

Издательский центр «Академия»
www.academia-moscow.ru