

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

**И.А. Каледа, Л.В. Круглов, Б.М. Гришин**

## **ГИДРОЛОГИЯ**

Рекомендовано Редсоветом университета  
в качестве учебного пособия для студентов,  
обучающихся по направлению подготовки 20.03.01  
«Техносферная безопасность»

Пенза 2016

УДК 55(075)  
ББК 26.22 я 7  
К17

Рецензенты: кафедра инженерной экологии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства (зав. кафедрой доктор технических наук, профессор В.С. Демьянова);  
главный инженер ФГБУ «Сурский гидроузел» А.А. Варламов

**Каледа И.А.**

К17 Гидрология: учеб. пособие по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» / И.А. Каледа, Л.В.Круглов, Б.М. Гришин. – Пенза: ПГУАС, 2016. – 188 с.

Изложены основы гидрологии – науки, изучающей природные воды Земли и протекающие в них закономерности. Рассмотрены процессы взаимодействия оболочек Земли, физические закономерности гидрологических процессов, круговорот воды на Земле. Описаны приборы для измерения давлений, уровня жидкости, скоростей и расходов потоков, а также принцип их действия и область применения. Рассмотрены методы и средства проведения гидрологических исследований на реках и водохранилищах, способы выполнения гидрологических и водохозяйственных расчётов. Описаны особенности гидрологических процессов в водных объектах различных типов – в реках, озерах, водохранилищах, подземных водах, болотах, морях и океанах.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» и предназначено для самостоятельной работы студентов направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» при изучении дисциплины «Гидрология».

© Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства, 2016

© Каледа И.А., Круглов Л.В.,  
Гришин Б.М., 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработанный в ПГУАС по программе бакалавриата рабочий учебный план в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования (ФГОС ВО) по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» включают дисциплину «Гидрология». Она отнесена к обязательным дисциплинам вариативной части профессионального модуля.

Учебное пособие направлено на формирование у студентов общекультурных (ОК) и профессиональных (ПК) компетенций: владение культурой безопасности и риск-ориентированным мышлением, при котором вопросы безопасности и сохранения окружающей среды рассматриваются в качестве важнейших приоритетов в жизни и деятельности; способность ориентироваться в основных проблемах техносферной безопасности.

Дисциплина «Гидрология» изучается во втором семестре. Для эффективного освоения дисциплины на первом курсе при небольшом количестве аудиторных часов особое значение приобретает самостоятельная работа студентов, которая требует четкой организации и обеспеченности литературой. Настоящее учебное пособие предназначено для самостоятельной работы студентов и содержит как обязательные «программные» материалы, так и дополнительную информацию, иллюстративные материалы.

Учебное пособие из общего многообразия задач гидрологии выделяет задачи рационального использования водных ресурсов, наиболее актуальные для экологов. Пособие учитывает общий уровень технической, математической и профессиональной подготовки студентов первого курса. Оно ориентировано на формирование профессионального интереса при решении вопросов охраны водных бассейнов Земли, на выявление взаимосвязей природных процессов с научной и хозяйственной деятельностью человека.

Учебное пособие включает:

- теорию и вопросы практического применения гидрологических исследований различных водных объектов;
- примеры гидрологических расчётов по оценке режима и водности водных объектов;
- схемы, рисунки, графики и другие иллюстрации;
- вопросы для самопроверки по главам пособия;
- библиографический список и список рекомендуемой литературы.

Авторы пособия выражают благодарность рецензентам за высказанные замечания и предложения, повлиявшие на качество пособия и его содержание.

Просим отзывы и пожелания направлять авторам на кафедру «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» ПГУАС.

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение природных вод Земли всегда было в центре внимания человека [4, 9, 11, 14]. Без воды не могло бы быть человека, животного и растительного мира, так как большинство растений и животных состоит в основном из воды. Для многих живых существ вода служит средой обитания. Водные ресурсы определяют устойчивое развитие любого государства. От них зависит уровень жизни и развития населения, поэтому получение достаточного количества воды, пригодной для питья, удовлетворения культурно-бытовых и производственных потребностей населения, волнует человечество на всём протяжении его существования.

Развитие гидрологических знаний всегда наряду с извечным стремлением людей познать неизвестное стимулировалось практическими потребностями.

Первые примитивные гидрологические наблюдения люди стали проводить еще в глубокой древности – древние египтяне наблюдали за колебаниями уровня воды на Ниле с помощью «ниломеров» – первых гидрологических постов.

Появление некоторых гидрологических представлений связано с именами философов Древней Греции [11]:

- Фалес считал, что в основе всех явлений лежит «влажная природа» – все возникает из воды и в нее превращается;
- Гераклит полагал, что в основе всего сущего лежит кругооборот стихий – огня, воздуха, воды и земли; ему принадлежит знаменитый образ реки, в которую нельзя войти дважды;
- Платон и Аристотель задумывались о происхождении рек и источников;
- Геродот провел первые исследования древнего Нила и Дуная (Истра).

Древнеримский мыслитель Витрувий интересовался поиском подземных вод. Герон Александрийский первым предложил формулу для определения расхода водного потока. О познаниях древних римлян в гидрологии и гидротехнике свидетельствуют акведуки – водопроводы Рима.

Новый толчок в развитии гидрологических знаний приходится на эпоху Возрождения. Леонардо да Винчи (1452–1519) одним из первых нашел правильное толкование происхождения рек, отметив роль дождевых и подземных вод. Этот философ, ученый, художник провел первые наблюдения за динамикой водного потока и может считаться основоположником речной гидравлики.

Дальнейший прогресс в гидрологических знаниях приходится на XVII век [10]. Изучением гидрологических явлений занимался французский философ и математик Рене Декарт. Первые количественные оценки в гидрологии принадлежат Пьеру Пьеро (брату Шарля Пьеро – поэта, автора

сказок). Он рассчитал, что дождевой воды вполне достаточно для поддержания стока рек. Это направление в расчетах развил французский физик Эдм Мариотт. Впервые оценку испарения в гидрологических процессах сделал английский геофизик и астроном Эдмунт Галлей, друг и соратник Исаака Ньютона. Галлей первым дал представление о кругообороте воды в природе и его приближенную количественную оценку.

XVIII и XIX века ознаменовались достижениями французов Антуана Шези и Анри Дарси, швейцарца Даниила Бернулли (почетного члена Петербургской академии наук), ирландца Роберта Маннинга – они составляют основу современной гидромеханики.

Начало гидрологических наблюдений в России относится к XV–XVI векам [11]: в записях русских летописцев сохранились сведения о наводнениях, паводках, замерзании и вскрытии рек. Много данных о реках и озерах приведено в «Книге Большому чертежу» – приложению к одной из первых карт России (1552 г., 1627 г.). В этой книге имеются упоминания о наиболее крупных реках современной Пензенской области [12]: Кададе, Суре, Пензе и др. В 1773 г. эти сведения были переизданы Н.И. Новиковым под названием «Древняя Российская Идрография, содержащая описание Московского государства рек, озер, кладезей и какие по ним города и урочища и на каком они расстоянии».

В XVII веке начались наблюдения за уровнем воды на Москве-реке. При Петре I проводились первые гидрологические изыскания на Дону, Оке, Волге с целью использования этих рек для судоходства. В 1715 г. были организованы постоянные наблюдения за режимом Невы у Петропавловской крепости. В изучение рек заметный вклад внесли русские землепроходцы и географы. Ценные материалы по гидрографии дали экспедиции П.П. Семенова-Тянь-Шанского и Н.М. Пржевальского.

В XIX веке изыскания, связанные с улучшением условий судоходства на реках России, были расширены. Крупные гидрографические работы на реках провела созданная в 1875 г. при Министерстве путей сообщения Навигационно-описная комиссия. В 1881 г. были впервые опубликованы данные наблюдений за уровнем воды на реках. В конце XIX века в России были опубликованы крупные обобщающие работы известных естествоиспытателей В.М. Лохтина, Н.С. Лебявского, В.В. Докучаева, А.И. Воейкова, заложивших основы учения о реках.

Широкое развитие гидрологических изысканий и исследований в нашей стране началось в 20-х годах прошлого столетия. Эти исследования были направлены на комплексное использование водных ресурсов страны различными отраслями народного хозяйства: водоснабжением, гидроэнергетикой, водным транспортом, орошением, рыболовством [4]. В 1919 г. был создан Российский гидрологический институт, преобразованный в 1926 г. в ныне действующий Государственный гидрологический институт. В 1920 г.

был принят план электрификации России (план ГОЭЛРО), выполнение которого потребовало проведения широких гидрологических исследований.

В 1936 г. в нашей стране начались работы по составлению «Водного кадастра СССР» – систематизированных сведений о режиме рек, озер, морей, ледников, подземных вод.

В 1929 г. был учрежден Гидрометеорологический комитет при Совете Народных Комиссаров СССР, преобразованный в 1936 г. в Главное управление метеорологической службы при Совете Министров СССР, на который возлагалось проведение гидрологических наблюдений и исследований. После многочисленных переименований и преобразований с 1988 г. комитет носил название Государственный комитет СССР по гидрометеорологии (Госкомгидромет). Весь период своего существования комитет являлся ведущим в стране научным центром по гидрологическим наблюдениям и исследованиям и контролю окружающей среды.

В предвоенный период усилиями крупных ученых В.Г. Глушкова, Д.И. Кочерина, М.А. Великанова, С.Д. Муравейского, Б.В. Полякова, Е.В. Близняка и многих других были разработаны теоретические основы гидрологии суши. В послевоенные годы, когда восстанавливались и строились гидроэнергетические объекты на Днестре и Волге, межбассейновые судоходные каналы, мелиоративные оросительные системы на юге Европейской части Союза и в Средней Азии, системы осушения, гидрологические исследования еще больше активизировались. Появились новые объекты исследований: водохранилища, болота.

В настоящее время руководство наблюдениями и исследованиями в области гидрологии суши в Российской Федерации возложено на Федеральную службу по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Росгидромету подчинены региональные управления гидрометеослужбы, а им – местные центры по гидрометеорологии и разветвленная сеть гидрометеостанций и постов. В систему Росгидромета входят крупные научно-исследовательские учреждения: Государственный гидрологический институт (ГГИ) в Санкт-Петербурге, Государственный океанографический институт (ГОИН) в Москве, Государственный гидрохимический институт (ГХИ) в Ростове-на-Дону, Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации (Гидрометцентр России) в Москве, Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова (ГГО) в Санкт-Петербурге, Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ – МЦД) в Обнинске, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) в Санкт-Петербурге и др.

Заметными вехами в развитии гидрологии суши стали пять Всесоюзных и один Всероссийский гидрологические съезды (в 1924, 1928, 1957, 1973, 1986 и 2004 гг.). В 1960-е годы значительный импульс получило ме-

ждународное сотрудничество в области гидрологии суши. В рамках Международного гидрологического десятилетия, учрежденного ЮНЕСКО на 1965–1974 гг., была проведена огромная работа по подготовке к изданию капитального труда «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли» (1974 г.). С 1975 г. осуществляется постоянно действующая Международная гидрологическая программа (МГП) ЮНЕСКО, в которой активно участвуют ученые-гидрологи нашей страны из различных учреждений.

В последнее десятилетие важной частью гидрологических исследований в России стали изучение реакции вод суши на глобальное потепление и оценка изменений режима водных объектов суши под воздействием деятельности человека.

Особо важную роль в глобальных исследованиях гидросферы Земли играют длительные исследования российскими учеными ледников Антарктиды. Первым, кто предположил, что «острова и матерая земля» вблизи Южного полюса покрыта снегами и льдом, был М.В. Ломоносов. Его предсказания подтвердили в январе 1820 г. участники русской исследовательской экспедиции под командованием Ф.Ф. Беллингаузена и М.П. Лазарева, а позже – участники наземных американских, французских, английских и норвежских экспедиций. 14 декабря 1911 года Р. Амудсен впервые достиг Южного полюса. Широкие исследования ледников Антарктиды начались в 50-е годы XX столетия. Совместные исследования гляциологов СССР, США, Англии и других стран были начаты в Антарктиде во время Международного геофизического года (1957–1959 гг.). Советский Союз взял на себя исследования самых труднодоступных и совершенно не изученных районов Антарктиды: на берегу моря Дэвиса были построены поселок и обсерватория Мирный; на склоне ледникового купола Восточной Антарктиды – первая внутриконтинентальная научная станция «Пионерская». Затем были созданы российские научные станции «Восток» (работает и в настоящее время), «Полюс недоступности» и научные станции других стран.

С 1978 г. в СССР введен Государственный водный кадастр (ГВК), представляющий собой систематизированный, постоянно пополняемый и уточняемый свод сведений о:

- водных объектах, составляющих единый государственный водный фонд;

- режиме, качестве и использовании вод.

ГВК состоит из трех разделов:

- 1) поверхностные воды (реки и каналы; озера и водохранилища; качество вод суши; селевые потоки; ледники; моря и морские устья рек);

- 2) подземные воды;

- 3) использование вод.

Данные ГВК подразделяются на архивные материалы (книги наблюдений, таблицы и др.); долговременные технические носители информации

(микрофильмы, магнитные ленты); публикуемые материалы (каталоги водных и водохозяйственных объектов; ежегодные и многолетние данные о режиме и др.). «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» служат продолжением издававшихся до 1978 г. «Гидрологических ежегодников» и «Материалов наблюдений на озерах и водохранилищах». В рамках Государственного водного кадастра в настоящее время создаются банк данных водных ресурсов и автоматизированная информационная система (АИС ГВК).

В комплексе осуществляемых в России мер по защите водных ресурсов от истощений и загрязнения особая роль принадлежит введенной еще в 1970-х годах системе мониторинга качества поверхностных вод. Такой мониторинг осуществляет Государственная служба наблюдений и контроля за загрязнением объектов природной среды.

Природные воды Земли играют значительную роль в поддержании относительно неизменного климата на планете, поскольку они, с одной стороны выступают как аккумулятор тепла, обеспечивая постоянство средней планетарной температуры атмосферы, а с другой – за счет фитопланктона продуцируют почти половину всего кислорода атмосферы.

Водные ресурсы Российской Федерации [1, 4] слагаются из запасов поверхностных (речной сток, озёра, болота, ледники) и подземных вод. Объём речного стока, формирующегося на территории России, составляет 4043 км<sup>3</sup>/год, что соответствует 236 тыс. м<sup>3</sup>/год на 1 км<sup>2</sup> территории и 27,8 тыс. м<sup>3</sup>/год на одного жителя [4]. Дополнительный сток, поступающий из сопредельных государств, составляет 227 км<sup>3</sup>/год. В России насчитывается более 2,3 млн озёр, запасы воды в которых составляют 26 068 км<sup>3</sup>. В болотах, которые расположены на северо-западе и севере европейской части страны и в северных районах Западной Сибири, сосредоточено около 3 тыс. км<sup>3</sup> воды. Источником чистой пресной воды являются ледники, расположенные на арктических островах и в горных районах – 39890 км<sup>3</sup>.

Объём естественных запасов подземных вод в России оценивается в 28 тыс. км<sup>3</sup> воды. На территории страны разведано более 3 370 месторождений подземных вод, из которых используется лишь 48 %. Эксплуатационные запасы разведанных месторождений составляют 28,5 км<sup>3</sup>/год. Степень их использования не превышает 33 %.

В России, как и в других странах, наблюдается большая неравномерность распределения водных ресурсов по территории страны. Внутригодная и многолетняя изменчивость речного стока затрудняет обеспечение экономики государства необходимым количеством воды. Эта проблема решается за счет регулирования речного стока путём создания водохранилищ, суммарный объём которых составляет 793 км<sup>3</sup> при суммарной площади зеркала 65 тыс. км<sup>2</sup>.

Основными источниками воды для нужд промышленного и коммунального водоснабжения служат реки, водохранилища и озера. Для оценки водности этих источников, их пригодности для надёжного водоснабжения различных объектов необходимо знание процессов, протекающих в водных объектах; зависимостей характеристик водных объектов от физико-географических факторов; повторяемости процессов во времени. В связи с большой неравномерностью распределения водных ресурсов на Земле в регионах нашей страны возникает необходимость перераспределения речного стока во времени, а порой – и в пространстве. Изучением вопросов формирования речного стока, использования стока естественных или зарегулированных рек, измерениями показателей стока занимается гидрология.

# 1. ГИДРОЛОГИЯ КАК НАУКА

## 1.1. Понятие о гидросфере. Водные объекты. Использование природных вод

Гидросфера – водная оболочка Земли. Гидросфера находится в постоянном взаимодействии с другими сферами Земли – атмосферой, литосферой и биосферой. Верхняя граница гидросферы условно проходит по поверхности раздела с атмосферой (в действительности – с тропосферой). Нижнюю границу – границу с литосферой – проследить невозможно вследствие глубокого проникновения вод в толщу земной коры. Таким образом, понятие «гидросфера» включает в себя все свободные воды Земли, не связанные химически или физически с минералами земной коры. Это океаны, моря, реки, озера, подземные воды и ледники, снеговой покров, а также водяные пары в атмосфере.

Поверхность Мирового океана, занимающая около 71 % земной поверхности, расположена между атмосферой и литосферой. Поперечник Земли, т.е. ее экваториальный диаметр, составляет 12760 км, а средняя глубина океана в его современном ложе – 3,7 км. Следовательно, толщина слоя воды в жидком состоянии в среднем составляет лишь 0,03 % земного диаметра [4]. В сущности, это тончайшая водяная пленка на поверхности Земли, но, как и озоновый защитный слой, играющая исключительно важную роль в биосферной системе.

Гидросфера играет очень большую роль в жизни нашей планеты. Она накапливает солнечное тепло и перераспределяет его на Земле; с Мирового океана на сушу поступают атмосферные осадки. Мировой океан особенно влияет на климат прибрежных территорий.

В настоящее время гидросфера охвачена невиданными по скорости и размерам преобразованиями, связанными с технической деятельностью человека. Ежегодно используется около 5 тыс. км<sup>3</sup> воды, а загрязняется в 10 раз больше. Некоторые страны начали ощущать нехватку пресной воды.

Гидросфера взаимодействует со всеми оболочками Земли [5]. О связи ее с литосферой свидетельствует эрозийная и аккумулятивная работа вод, влияющая на формирование рельефа. Взаимодействует гидросфера и с атмосферой: облака состоят из паров воды, испарившихся с поверхности морей и океанов. Так как живые существа, населяющие биосферу, не могут жить без воды, можно говорить о взаимосвязи гидросферы и с биосферой. Взаимодействуя с различными оболочками планеты, гидросфера выступает, в свою очередь, как часть целостной природы Земли.

Гидросфера едина. Ее единство – в общности происхождения всех природных вод из мантии Земли, в их пространственной непрерывности и взаимосвязанного в системе мирового круговорота воды в природе.

Вода на Земле присутствует во всех трех агрегатных состояниях, однако наибольший объем ее приходится на жидкую фазу, которая весьма значима для формирования других особенностей планеты. Гидросфера Земли [5] на 94 % представлена солеными водами океанов и морей, более 75 % всей пресной воды законсервировано в полярных шапках Арктики и Антарктиды (табл. 1.1).

Т а б л и ц а 1 . 1

Распределение водных масс в гидросфере Земли

Виды природных вод	Площадь		Объем, тыс. км <sup>3</sup>	Доля в мировых запасах в %	
	млн км <sup>2</sup>	% площади суши		от общих запасов воды	от запасов пресных вод
Воды на поверхности литосферы					
Мировой океан	361,0	–	1338000	96,4	–
Ледники	16,3	11,0	25800	1,86	70,3
Озера	2,1	1,4	176	0,013	–
в т.ч. пресные	1,2	0,8	91	0,007	0,25
Водохранилища	0,4	0,3	6	0,0004	0,016
Вода в реках	–	–	2	0,0002	0,005
Вода в болотах	2,7	1,8	11	0,0008	0,03
Воды в верхней части литосферы					
Подземные воды	–	–	23400	1,68	–
в т.ч. пресные	–	–	10530	0,76	28,7
Подземные льды, зоны многолетнемерзлых пород	2,1	14	300	0,022	0,82
Вода в атмосфере и организмах					
Вода в атмосфере	–	–	13	0,001	0,04
Вода в организмах	–	–	1	0,0001	0,003
Общие запасы воды					
Общие запасы воды	–	–	1 388 000	100,00	–
в т.ч. пресной	–	–	36 700	2,64	100

Водный кодекс Российской Федерации [2] определяет *водные объекты* и их виды следующим образом (ст. 1 ВК РФ): «Водный объект – природный или искусственный водоём, водоток или иной объект, постоянное или временное сосредоточение вод, которое имеет характерные формы и признаки водного режима». То есть, водный объект – естественное или рукотворное образование с постоянным или временным скоплением вод. Он имеет характерные формы и признаки водного режима (изменение во времени уровня, расхода и объема и даже агрегатных состояний).

Скопление различных видов вод может быть как в формах рельефа, так и в недрах. Различают [2, 6], в связи с этим, *поверхностные* водные объек-

ты, состоящие из поверхностных вод и покрытых ими земель в пределах береговой линии, и *подземные* водные объекты.

К поверхностным водным объектам относятся [2] (ст. 5 ВК РФ):

- моря и их отдельные части (проливы, заливы, в том числе бухты, лиманы и др.);
- водотоки (реки, ручьи, каналы);
- водоёмы (озера, обводненные карьеры, пруды, водохранилища);
- болота;
- ледники, снежники;
- природные выходы подземных вод (родники, гейзеры).

К подземным водным объектам относятся бассейны подземных вод, водоносные горизонты.

Водные объекты в соответствии с Водным кодексом [2] делятся на виды:

*Общего пользования* – общедоступные поверхностные водные объекты, находящиеся в государственной или муниципальной собственности (ст. 6 ВК РФ).

*Особо охраняемые* – водные объекты (или их части), имеющие особое природоохранное, научное, культурное, а также эстетическое, рекреационное и оздоровительное значение. Их перечень определяется законодательством об особо охраняемых природных территориях (ст. 66 ВК РФ).

Существуют природные образования переходного характера, которые не обладают признаками водного объекта, но обладают «возможностью» вредного воздействия. Примером таких образований являются, в частности, «дышащие» озера. Суть явления заключается в неожиданном и быстром (иногда в одну ночь) появлении и исчезновении «большой воды» во впадинах рельефа, болотистых и луговых низменностях (иногда площадью до 20 км<sup>2</sup>). «Дышащие» озера наблюдаются в Ленинградской области, Прионежье, в Новгородчине, Архангельской области, в Вологодчине, в Дагестане. Внезапно возникающие возле населенных пунктов и различных коммуникаций озера подтопляют их. Есть случаи, когда такие «временные водоемы» становились водными путями для речного и рыболовного флота. Так, существовавшее в конце 19 века в США озеро Алахуа, неожиданно возникшее во Флориде, на целое десятилетие стало судоходным.

Водная среда используется для лова рыбы и других морепродуктов, сбора растений, добычи подводных залежей руды (марганца, никеля, кобальта) и нефти, перевозки грузов и пассажиров. В производственной и хозяйственной деятельности человек применяет воду для очистки, мытья, охлаждения оборудования и материалов, полива растений, обеспечения специфических процессов, например выработки электроэнергии и т.п. Во многих случаях использование водных ресурсов является настолько важным, что составляет неотъемлемую часть некоторых отраслей народного хозяй-

ства. Например, в районах недостаточного увлажнения сельскохозяйственное производство основано на искусственном орошении.

В других случаях человек вынужден бороться с вредным воздействием воды на хозяйственную деятельность. Например, он преодолевает реки как преграды на пути, устраивая мосты, переправы и т.д., проводит мероприятия по борьбе с водной стихией, возводя специальные сооружения для предотвращения наводнений, затопления застроенных территорий и различных хозяйственных сооружений.

Сложность инженерного воздействия на водные объекты привела к тому, что с давних пор существует специальная отрасль инженерного искусства – гидротехника, которая рассматривает вопросы, связанные с использованием водных объектов путём строительства на них различных гидротехнических сооружений (плотин, водозаборных сооружений, регуляторов, мостовых переходов, берегозащитных сооружений и т.п.) [14].

С появлением современного оборудования в домашнем хозяйстве, новых промышленных процессов и более совершенной сельскохозяйственной техники потребление воды увеличилось. Вода используется всюду: для мытья, стирки, орошения, охлаждения, тушения огня, в качестве растворителя и т.д. В слаборазвитой сельскохозяйственной стране потребление воды сведено до минимума. При отсутствии водопровода потребление воды на душу населения для питья, приготовления пищи и мытья можно ограничить до 20 л в сутки. Но в современной квартире только на одну ванну расходуется воды вдвое больше. При использовании стиральных машин, дождевальных установок для полива газонов и других устройств потребление воды часто достигает 600 л на человека в сутки. Если учесть затраты воды промышленностью, проблема водоснабжения даже небольших городов становится трудноразрешимой. Так, на обработку 1 кг мяса идет 10 л воды, на производство 1 кг бумаги – 100 л, на изготовление 1 кг стали – почти 200 л. К счастью, большую часть воды, использованной промышленностью, после соответствующей обработки можно использовать повторно.

С ростом населения и развитием хозяйства территорий, плохо обеспеченных водными ресурсами, становится все больше. Высказывается мнение о том, что близится время, когда традиционные источники водных ресурсов – речные и подземные воды – будут исчерпаны.

Нельзя сказать, что основание для подобных высказываний отсутствует. В решении важных для человека проблем использования и охраны водных ресурсов допускается немало просчетов, главный из которых – загрязнение в больших масштабах рек и озер. Именно в этом заключается основная угроза истощения водных ресурсов. Каждый кубометр сточных вод, сброшенный в реки, загрязняет в десятки раз больше пока еще относительно чистых речных и озерных вод. Воды может быть много, но если она за-

грязнена, то пользы от такой воды мало – ее нельзя использовать, она угрожает здоровью людей.

Многие вопросы гидрологии представляют интерес только для ученых [10]. Тем не менее, гидрология – одна из наук о Земле, которая своим возникновением в значительной степени обязана требованиям практики. Действительно, многие важные открытия в области гидрологии сделаны в результате исследований, проведенных с целью разрешения проблем большого экономического значения. Вероятно, такое положение сохранится в будущем, поскольку потребности в воде, несомненно, будут увеличиваться с ростом населения и развития промышленности.

Для наиболее рационального использования воды необходимо, прежде всего, изучить водные объекты, выявить их современное состояние, режим и возможные изменения в будущем.

## 1.2. Предмет изучения, составные части гидрологии

Гидрология – наука, занимающаяся изучением природных вод, явлений и процессов, в них протекающих, а также определяющих распространение вод по земной поверхности и в толще почвогрунтов; закономерностей, по которым эти явления и процессы развиваются.

В гидрологии должен быть освещен широкий круг вопросов, которые возникают при планировании разнообразных водохозяйственных мероприятий [4, 5, 9, 10, 11, 14]. При исследовании водных ресурсов, проводимых в гидрологии, применяются положения и выводы ряда смежных научных дисциплин, например:

- гидротехники, определяющей содержание и объем исследований;
- геоморфологии – для описания форм рельефа земной поверхности в зоне воздействия изучаемого объекта;
- метеорологии – для освещения климатических и погодных факторов, оказывающих влияние на режим изучаемых объектов;
- геологии – для описания характера и водных свойств грунтов и пород, слагающих ложе и бассейн водоемов и водотоков.

**К задачам гидрологии** относится изучение свойств воды, процессов, протекающих в водных объектах, зависимости характеристик водных объектов от физико-географических факторов.

Гидрология подразделяется на два больших раздела: *гидрология суши*, предметом изучения которой являются все водные объекты, расположенные в пределах суши, и *гидрология моря (океанология)*. Важной частью гидрологии является гидрометрия – наука о средствах и методах изучения величин, характеризующих движение воды и режим водных объектов. Гидрометрия – раздел гидрологии, в котором рассматриваются методы всех измерений и наблюдений, ведущихся с целью изучения гидрологиче-

ского режима вод. Основным предметом нашего изучения являются гидрология и гидрометрия вод суши.

### 1.3. Методы изучения гидрологических процессов

Современная гидрология располагает большим арсеналом взаимодополняющих друг друга методов изучения гидрологических процессов. Среди них важное место занимают *методы полевых исследований*, которые подразделяются на *стационарные и экспедиционные*. Большинство результатов стационарных наблюдений на сети гидрологических станций и постов публикуется в материалах Государственного водного кадастра (ГВК), который представляет собой систематизированный, постоянно пополняемый и уточняемый свод сведений о водных объектах, режиме, качестве, использовании вод и составляет единый Государственный водный фонд страны.

В гидрологии широко используются *экспериментальные исследования* (в природных условиях или в лаборатории). При анализе материалов гидрологических наблюдений используются *эмпирические и статистические методы*. *Теоретические методы анализа* гидрологических процессов включают приемы географического обобщения, картографирования, методы математического и имитационного моделирования, системный анализ и др.

### 1.4. Круговорот воды в природе. Водный баланс в гидрологии

Постоянный обмен влагой между гидросферой, атмосферой и земной поверхностью получил название *круговорота воды в природе*. Круговорот воды в природе состоит из процессов испарения, передвижения водяного пара в атмосфере, его конденсации в атмосфере, выпадения осадков и стока по земной поверхности. Атмосферные осадки частично испаряются, частично образуют временные и постоянные водостоки и водоемы, частично просачиваются в землю и образуют подземные воды.

Круговорот воды в природе (гидрологический цикл) – процесс циклического перемещения воды в земной биосфере. Кругооборот воды на земном шаре – замечательная особенность гидросферы Земли и природных условий планеты. Кругооборот воды создает основной механизм перераспределения на Земле вещества и энергии, объединяет воедино не только водные объекты, но и все части планеты. Кругооборот воды на Земле – основа возобновляемости водных ресурсов. Вода непрерывно циркулирует на земном шаре, при этом ее общее количество остается неизменным.

Различают несколько видов круговоротов воды в природе:

*Большой, или мировой, круговорот* – водяной пар, образовавшийся над поверхностью океанов, переносится ветрами на материки, выпадает

там, в виде атмосферных осадков и возвращается в океан в виде стока. В этом процессе изменяется качество воды: при испарении соленая морская вода превращается в пресную, а загрязненная – очищается.

*Малый, или океанический, круговорот* – водяной пар, образовавшийся над поверхностью океана, сконденсируется и выпадает в виде осадков снова в океан.

*Внутриконтинентальный круговорот* – вода, которая испарилась над поверхностью суши, опять выпадает на сушу в виде атмосферных осадков.

Океанический и материковый кругообороты связаны между собой переносом водяного пара на сушу и, наоборот, поверхностным и подземным стоком в океан (рис. 1.1).

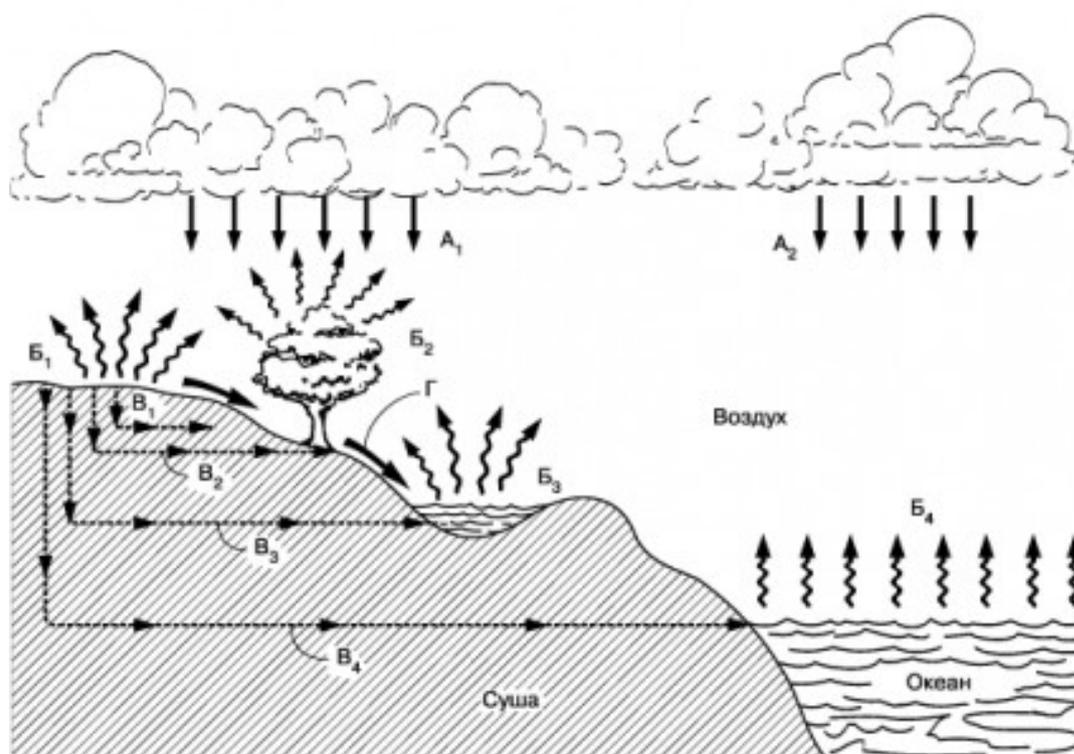


Рис. 1.1. Круговорот воды в природе:

A1 – осадки, выпадающие над сушей; A2 – осадки, выпадающие над океаном; B1 – испарение с суши; B2 – транспирация растительностью; B3 – испарение с озер и рек; B4 – испарение с океана; V1 – инфильтрация воды в почву; V2 – потребление воды растительностью; V3 – подземный сток воды в реки и озера; V4 – подземный сток воды в океан; Г – поверхностный сток в озера и реки

Приведенная схема кругооборота воды на земном шаре в действительности гораздо более сложна. Во-первых, перенос влаги с океана на сушу осложнен ее частичным испарением и транзитом. Во-вторых, при исследовании гидрологических процессов на суше очень важно учитывать, что суша подразделяется на две части: *область внешнего стока* (выпадающие над

ней осадки так или иначе попадают в Мировой океан) и *область внутреннего стока* (бессточная область), не дающая стока в Мировой океан.

Главный водораздел земного шара делит всю сушу на два склона: первый – со стоком рек в Атлантический и Северный Ледовитый океаны и второй – со стоком рек в Тихий и Индийский океаны. Главный водораздел проходит по Южной и Северной Америке от Мыса Горн по Андам, Скалистым горам до Берингова пролива, по восточному нагорью Азии, пересекает его в широтном направлении, а затем продолжается вдоль восточной окраины Африки к ее южной оконечности. К бассейну Северного Ледовитого океана относится 15 % всей площади суши, Атлантического – 34, Тихого – 17, Индийского – 14 %.

Доля бессточных территорий составляет 20 % от площади суши. К наиболее обширным областям внутреннего стока относятся:

- в Европе – водосборный бассейн Каспийского моря;
- в Азии – обширная Туранская низменность, включающая бассейны Аральского моря и озера Балхаш, пустыни Алашань, Гоби, Такла-Макан, часть Аравийского полуострова и др.;
- в Африке – пустыни Сахара, Ливийская, Нубийская, Калахари, водосборы озер Чад, Рудольф и др.;
- в Северной Америке – пустыня Большого Бассейна, включая район Большого Соленого озера и др.;
- в Южной Америке – водосборы озер Титикака, Поопо, полупустыни плато Патагонии и др.;
- в Австралии – западная и центральная части материка (более 50 % всей площади).

Внутриматериковый влагооборот зависит от видов участвующей в нем влаги. Скорость переноса различных видов воды изменяется в широких пределах, так как и периоды расходов, и периоды обновления воды также разные. Они изменяются за время от нескольких часов до нескольких десятков тысячелетий. Запасы почвенной влаги имеют примерно летний период накопления и расходов. Атмосферная влага, которая образуется при испарении воды с поверхности океанов, морей и суши и существует в виде облаков, обновляется в среднем через восемь дней.

Воды, входящие в состав живых организмов, восстанавливаются в течение нескольких часов. Это наиболее активная форма водообмена. Период обновления запасов воды в горных ледниках составляет около 1600 лет, в ледниках полярных стран значительно больше – около 9700 лет. Полное обновление вод Мирового океана происходит примерно через 2700 лет.

Время очистки и обновления воды в элементах гидросферы приведено в табл. 1.2 [11].

Т а б л и ц а 1.2

Время очистки и обновления воды в элементах гидросферы

Элементы гидросферы	Среднее время обновления и очистки
Океаны	200 лет
Ледники	от 20 до 100 лет
Сезонный снежный покров	от 2 до 6 месяцев
Почвенная корка	от 1 до 2 месяцев
Грунтовые воды: паводок	от 100 до 200 лет
Грунтовые воды: углубленные	10 000 лет
Озера	от 50 до 100 лет
Реки	от 2 до 6 месяцев
Атмосфера	9 дней

Схема круговорота воды может быть выражена уравнением водного баланса, которое определяет связь между приходом и расходом влаги для всего земного шара. Приходная часть баланса – осадки, расходная – испарение и сток.

Примем следующие обозначения:

$X_0$  – средние часовые осадки, выпадающие на поверхность океанов;

$X_c$  – средние часовые осадки, выпадающие на поверхность суши;

$E_0$  – среднечасовое испарение с поверхности океанов;

$E_c$  – среднечасовое испарение с поверхности суши;

$y$  – сток рек.

Ежегодно с поверхности морей и океанов испаряется количество воды, равное количеству выпадающему на них осадков плюс речной сток, то есть

$$E_0 = X_0 + y. \quad (1.1)$$

С поверхности суши в среднем за год испаряется столько воды, сколько выпадает на неё осадков, за вычетом воды, стекающей в моря и океаны:

$$E_c = X_c - y. \quad (1.2)$$

Объединив два этих уравнения, получим общее уравнение водного баланса земного шара в виде

$$E_0 + E_c = X_0 + X_c, \quad (1.3)$$

то есть испарения воды с поверхности воды с поверхности морей, океанов и суши равна сумме осадков, выпавших на поверхность морей, океанов и суши.

Водный баланс – соотношение за какой-либо промежуток времени (год, месяц, декада) прихода, расхода и аккумуляции (изменение запаса) воды для речного бассейна или участка территории, для озера, болота или

любого другого исследуемого объекта. Например, уравнение водного баланса для бассейна реки:

$$O + K + n = I + C + p \pm \Delta\omega, \quad (1.4)$$

где  $O$  – осадки;

$K$  – конденсация паров в почве;

$n$  – приток из соседних бассейнов;

$I$  – испарение;

$C$  – сток реки;

$p$  – отток в другие бассейны;

$\Delta\omega$  – изменение запасов воды в бассейне.

## 1.5. Водные ресурсы

### 1.5.1. Основные положения

*Водные ресурсы* – пригодные для использования воды. Практически – это все воды гидросферы, т.е. воды рек, озер, каналов, водохранилищ, морей и океанов, подземные воды, почвенная влага, вода (льды) горных и полярных ледников, водяные пары атмосферы [2, 6, 7, 16]. В понятие водных ресурсов входят также водные объекты – реки, озера, моря, поскольку для некоторых целей (судоходство, гидроэнергетика, рыбное хозяйство, отдых и туризм) они используются без изъятия из них воды.

*Речные водные ресурсы* состоят из двух неравноценных, различных по происхождению частей: подземной и поверхностной. Первая устойчива, поэтому, как правило, не требует регулирования. Вместе с тем она в общем виде характеризует возобновляемые запасы подземных вод зоны активного водообмена. Глубинные подземные воды (ниже уровня дренажа рек) слабо участвуют в современном круговороте воды, носят застойный характер и поэтому чаще всего сильно минерализованы. Поверхностный (паводочный) сток весьма изменчив и для использования, как правило, требует регулирования.

Из стационарных запасов гидросферы менее 2 % относится к пресным водам. Но если исключить воды (льды) полярных ледников, пока недоступных для использования, то на долю доступных для использования пресных вод приходится всего лишь 0,3 % стационарного объема гидросферы. Речные водные ресурсы под влиянием высокой активности (в среднем сменяются каждые 11 суток), как правило, пресные. Пресными же являются и проточные озера и большая часть подземных вод зоны активного водообмена. Эти источники водных ресурсов наиболее широко используются для разнообразных целей (водоснабжение, орошение, от-

дых и туризм, рыболовство и рыбозаводство, гидроэнергетика, внутреннее судоходство).

Теоретически водные ресурсы неисчерпаемы, так как при рациональном использовании они непрерывно возобновляются в процессе круговорота. Еще в недалеком прошлом считалось, что воды на Земле так много, что, за исключением отдельных засушливых районов, людям не надо беспокоиться о том, что ее может не хватить. Однако потребление воды растет такими темпами, что человечество все чаще сталкивается с проблемой, как обеспечить будущие потребности в ней. Во многих странах и районах Европы, Америки уже ощущается недостаток водных ресурсов, усиливающийся с каждым годом. Большую опасность истощения водных ресурсов вызывает быстро возрастающее загрязнение речных, озерных и в значительной мере морских вод, вызванное сбросом в них сточных вод.

На все виды водоснабжения на Земле в год расходуется  $150 \text{ км}^3$  воды, но одновременно сбрасывается в реки и озера около  $450 \text{ км}^3$  сточных вод, для обезвреживания которых требуется св.  $5500 \text{ км}^3$  чистой речной воды, что составляет  $1/7$  часть мировых ресурсов речного стока. Если продолжать сброс сточных вод в реки, то даже при существенном улучшении качества их предварительной очистки вскоре для этой цели потребуются израсходовать все мировые ресурсы речного стока.

Во избежание качественного истощения водных ресурсов необходимо проведение комплекса целенаправленных мер, среди которых видное место принадлежит всемерному сокращению, а впоследствии и полному прекращению использования рек, озер и водохранилищ для удаления и обезвреживания сточных вод. Это возможно осуществить путем повторного использования сточных вод (орошение сельскохозяйственных полей, применение после очистки на некоторых предприятиях), а также путем всемерного снижения водоемкости производства, т.е. уменьшения расхода воды на единицу продукции и перевода некоторых водоемких производств на сухую технологию [1, 14].

Расширенное производство водных ресурсов, т.е. увеличение наиболее доступных для использования за счет труднодоступных или потенциальных водных ресурсов, широко применяется в практике водного и сельского хозяйства. Это достигается преобразованием водных ресурсов, например, путем умножения ресурсов почвенной влаги мелиоративными и агротехническими средствами, а также устойчивого речного стока за счет поверхностного (паводочного) стока путем регулирования водохранилищами. Важное значение приобретает искусственное магазинирование подземных вод (устройство крупных постоянно пополняемых подземных водохранилищ с большим транзитом воды).

### 1.5.2. Водные ресурсы Пензенской области

В Пензенской области насчитывается 2746 рек и ручьёв общей протяжённостью 15458 км. Речной сток ориентировочно оценивается в 5–5,5 км<sup>3</sup> и формируется поверхностными и частично почвенно-грунтовыми водами и родниками, которых на территории области насчитывается около 1500–2000 [12].

Реки Пензенской области относятся к бассейнам двух крупных рек Европейской территории Российской Федерации – Волжскому (реки Сура, Труев, Кадада, Уза, Атмисс, Выша, Вад – 72 % водосборной площади или 31,2 тыс. км<sup>2</sup>) и Донскому (реки Хопер, Сердоба, Ворона, Чембар – 28 % водосборной площади или 12,1 тыс. км<sup>2</sup>). Водораздел между этими бассейнами в пределах Пензенского края проходит по Керенско-Чембарской возвышенности.

Наиболее крупные реки области – Сура, Уза, Мокша, Хопёр, Ворона.

Питание рек на 87 % осуществляется за счет местного стока и только на 13 % за счет притока воды из соседних областей. Все реки – равнинные, обладают широкими поймами. Питание их смешанное: преимущественно снеговое (60 %) и отчасти грунтовое (23 %) и дождевое (17 %). За период весеннего половодья, которое начинается в первой декаде апреля и заканчивается в середине мая, проходит более 60 % годового объёма стока. Весенний подъем воды не превышает 3–5 м.

При достаточно большой разветвленности речной сети водные ресурсы рек Пензенской области невелики, так как почти все они берут свое начало и оканчиваются в пределах области, имеют небольшую длину и незначительные расходы воды. Даже такие крупные для Пензенской области реки, как Сура, Мокша, Хопер, Ворона, Вад, Выша проходят здесь только своими маловодными верховьями и становятся полноводными уже за пределами области. По водообеспеченности поверхностные источники Пензенской области беднее рек соседних регионов. Все реки области из-за незначительной глубины несудоходны, однако полного исчезновения рек за последние 15 лет не отмечено.

Озёра на территории области немногочисленны и распространены в основном в поймах Суры, Мокши, Хопра. Как правило, это небольшие пойменные озёра-старицы, подверженные большим сезонным колебаниям объёмов воды. Всего на территории области расположено 240 озёр с общей площадью зеркала воды 1700 га и объёмом 20,3 млн м<sup>3</sup>. Верховых и надпойменных озёр в области всего 16 с общим объёмом воды 1,8 млн м<sup>3</sup>. Только два озера – Лячерка в Наровчатском районе (105,6 га) и Моховое в Кузнецком (104 га) – относятся к озерам средней величины. Все остальные озера – к малым [12].

В 10 километрах выше Пензы в 1978 году на 212 километре от истока и в 629 км от устья на Суре было построено Пензенское водохранилище объёмом

ёмом 560 миллионов кубических метров (в настоящее время 522 млн м<sup>3</sup>). Средняя глубина водохранилища составляет 4,97 м, наибольшая глубина – 15,5 м, длина водохранилища 27 км, площадь зеркала 105 км<sup>2</sup>, протяженность береговой линии 109 км. Водоохранилище изменило гидрологический режим реки, которая теперь имеет регулируемый сток.

Пензенское водохранилище располагается на Приволжской возвышенности, расчленённой долинами рек Суры и Узы и их многочисленными притоками. Его питают, в основном, реки Сура и Уза, а также притоки – Няньга, Медоевка, Вежняньга, ручьи Кула, Казеевка, Алферьевка, Шиверга, Ранго-Лисьма, Круглый, Лямзай, Безымянный, Акулька. Долины рек Суры и Узы выше водохранилища сильно заболочены. Правый берег Пензенского водохранилища крутой и особенно залесен.

Самым актуальным вопросом для Пензенского водохранилища является состояние качества воды в нём. В прошлые годы проводились научно-исследовательские работы по внедрению различных методов очистки воды, таких, как альголизация (заселение зелёных водорослей), зарыбление водохранилища растительноядными видами рыб. С каждым годом качество воды в водохранилище улучшается. В целом вода в водоёме незначительно загрязнённая, для питьевого водоснабжения может использоваться с предварительной подготовкой.

На территории области 382 торфяных болота занимают площадь около 7,5 тыс. га (0,4 % от всей территории области) и содержат около 30 млн тонн торфа. Болота небольшие, только одно имеет площадь 220 га, остальные – от 1 до 10 га. Наиболее болотистая – восточная, самая увлажненная и лесистая часть области. Здесь сосредоточено до 200 болот общей площадью 3413,6 га. Средняя глубина торфяной залежи 1,4–1,7 м. Запасы воды в них незначительны. За последние десятилетия они значительно снизились, тогда как раньше представляли собой важный резерв поверхностных вод. Болота в общем балансе водного режима местности играют существенную водорегулирующую роль.

Родники являются стратегическими объектами природы [12]. При возникновении чрезвычайной ситуации они могут выступать как единственные источники питьевой воды для населения.

В Пензенской области учтено 532 родника, предположительно неучтенных источников еще около 1,5–2 тысяч. Наибольшее количество родников наблюдается на северо-востоке области. Например, в Лунинском районе известен 71 родник, в Кузнецком – 58, Городищенском – 49, Никольском – 40, Лопатинском – 35, Шемьшейском – 29 [12].

Пресные подземные воды в сравнении с поверхностными имеют более высокое качество и защищенность от поверхностного загрязнения, поэтому в условиях нарастающей техногенной нагрузки широко используются на территории области как источник питьевого централизованного водоснабжения.

Основными эксплуатируемыми водоносными комплексами на территории области являются:

- палеогеновый, широко распространенный в восточной части области. Водоотбор по нему в 2014 г. составил 36,52 тыс.м<sup>3</sup>/сут или 35,5 % от общего отбора подземных вод;

- меловой, наиболее используемый на большей части остальной территории области. Суммарный водоотбор из мелового водоносного комплекса составил 43,67 тыс.м<sup>3</sup>/сут (42,4 %);

- верхнедевонско-каменноугольный, за счет эксплуатации которого осуществляется водоснабжение южных, западных и северо-западных территорий области. Суммарный водоотбор из объединенного верхнедевонско-каменноугольного водоносного комплекса – 22,53 тыс.м<sup>3</sup>/сут (21,9 %);

- юрский водоносный горизонт эксплуатируется незначительно.

Доля пресных подземных вод в хозяйственно-питьевом водоснабжении в большинстве населенных пунктов области составляет 100 %, и лишь в г. Пенза – 2,5 %, в р.п. Колышлей – 23,6 %.

Минеральные подземные воды на территории области добываются из: палеогенового водоносного комплекса, ниже-верхнемелового, ниже-среднекаменноугольного, верхнедевонского. В 2009 г. (с учётом рассолов) было всего извлечено и использовано 0,0359 тыс.м<sup>3</sup>/сут, в том числе: минеральных вод – 0,0344 тыс.м<sup>3</sup>/сут (из них: для лечебных целей 0,0058 тыс.м<sup>3</sup>/сут, розлива – 0,0221 тыс.м<sup>3</sup>/сут); рассолов для лечебных целей – 0,0015 тыс.м<sup>3</sup>/сут. Использование минеральных подземных вод составляет 3,45 % по минеральным водам и 0,41 % по рассолам от количества утверждённых запасов.

В области разведаны и утверждены запасы на 13 месторождениях пресных подземных вод, включающих 29 участков. Общее количество эксплуатационных запасов по сумме всех категорий составляет 413,587 тыс.м<sup>3</sup>/сут, в том числе подготовленных к промышленному освоению – 322,087 тыс.м<sup>3</sup>/сут. Прогноз на эксплуатационные ресурсы подземных вод Пензенской области составляют 8357 тыс.м<sup>3</sup>/сутки. Обеспеченность ресурсами в расчете на 1 человека – 6 м<sup>3</sup>/сут, степень разведанности – 5 %, обеспеченность разведанными эксплуатационными запасами на 1 человека – 0,3 м<sup>3</sup>/сут.

По степени обеспеченности потребности населения в питьевой воде прогнозными эксплуатационными ресурсами Пензенская область относится к надежно обеспеченной. Общее количество добываемых пресных подземных вод составляет 31411 тыс. м<sup>3</sup> в год.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Как называется водная оболочка Земли?
2. Как называется в соответствии с Водным кодексом РФ природный или искусственный водоём, водоток или иной объект, постоянное или вре-

менное сосредоточение вод в котором имеет характерные формы и признаки водного режима?

3. К каким водным объектам относятся моря и их отдельные части (проливы, заливы, в том числе бухты, лиманы и др.); водотоки (реки, ручьи, каналы); водоёмы (озера, обводненные карьеры, пруды, водохранилища); болота; ледники, снежники; природные выходы подземных вод (родники, гейзеры)?

4. Что относится к подземным водным объектам?

5. Как называется наука, занимающаяся изучением природных вод, явлений и процессов, в них протекающих, а также определяющих распространение вод по земной поверхности и в толще почво-грунтов; закономерностей, по которым эти явления и процессы развиваются?

6. Какие задачи относятся к задачам гидрологии?

7. Что изучает гидрология суши?

8. Какой раздел гидрологии рассматривает методы всех измерений и наблюдений с целью изучения гидрологического режима вод?

9. Как подразделяются методы полевых исследований?

10. Какие исследования в гидрологии проводятся в природных условиях, а какие – в лаборатории?

11. Какие методы используются при анализе материалов гидрологических наблюдений?

12. Какие методы анализа гидрологических процессов включают приемы географического обобщения, картографирования, методы математического и имитационного моделирования, системный анализ?

13. Как называется постоянный обмен влагой между гидросферой, атмосферой и земной поверхностью?

14. Из каких процессов состоит круговорот воды в природе?

15. Какой вид кругооборота воды в природе описывают следующим образом: водяной пар, образовавшийся над поверхностью океанов, переносится ветрами на материки, выпадает там в виде атмосферных осадков и возвращается в океан в виде стока? В этом процессе изменяется качество воды: при испарении соленая морская вода превращается в пресную, а загрязненная – очищается.

16. Как описать внутриконтинентальный круговорот?

17. Что такое водный баланс?

18. Как называют пригодные для использования воды?

19. Почему реки Пензенской области не обладают большой водностью?

20. К бассейнам каких двух крупных рек относятся реки Пензенской области?

21. С какой целью на Суре было построено Пензенское водохранилище?

22. Какова доля пресных подземных вод в хозяйственно-питьевом водоснабжении в большинстве населенных пунктов Пензенской области?

## 2. ГИДРОЛОГИЯ РЕК

### 2.1. Общие сведения о реках

#### 2.1.1. Река, её притоки. Речная система

Реки обычно текут в вытянутых пониженных формах рельефа – **долинах**, наиболее пониженная часть которых называется **руслом**.

*Совокупность русел всех водотоков (постоянных и временных) в пределах какой-либо территории называется **русловой сетью***. Часть русловой сети, состоящая из отчетливо выраженных русел постоянных водотоков, называется **речной сетью или речной системой** [7, 11, 16].

Речная система состоит из **главной реки и притоков**. Главная река обычно впадает в море или озеро. Реки, впадающие в главную реку, называют *притоками первого порядка*. Притоки притоков соответственно называют притоками второго, третьего и так далее порядков. Наивысший порядок имеют самые малые реки, представляющие собой неразветвлённые водотоки. Возможна и обратная классификация притоков. Самые малые водотоки можно относить к первому классу. Тогда самый высокий класс будет иметь главная река. Следовательно, класс (порядок) реки может рассматриваться как количественная характеристика степени разветвленности речной системы.

*Исток* – место, где водоток (река или ручей) берет свое начало. На географической карте исток обычно представляется условной точкой. Истоком обычно является начало ручья, получающего воду из родника, конец ледника, озеро, болото. На болотных реках за исток часто принимается точка, с которой появляется открытый поток с постоянным руслом.

*Устье* – место впадения реки в водохранилище, озеро, море или другую реку. Часть реки, примыкающая к устью, может образовывать дельту или эстуарий (губа, лиман).

Длина реки обычно отсчитывается от истока вниз по течению по линии наибольших глубин – *фарватеру реки*. Фарватером реки часто называют ту часть реки, по которой осуществляется судоходство (при ограниченных глубинах). При анализе формирования русел кроме линии наибольших глубин используется понятие «*динамическая ось потока*» – линия на плане реки, в каждой точке которой скорость течения воды имеет наибольшее значение в живых сечениях. Линия, соединяющая точки с наибольшей поверхностной скоростью течения в живых сечениях потока, называется *стрежнем потока*. Если наибольшие скорости наблюдаются на поверхности воды, то динамическая ось потока и стрежень совпадают.

Поверхность суши, с которой речная система собирает свои воды, называется *водосбором или водосборной площадью* (частью земной поверхности, с которой вода поступает в отдельный водоток).

### 2.1.2. Характеристики бассейна реки

Водосборная площадь вместе с верхними слоями земной коры, включающая в себя данную речную систему и отделенная от других речных систем *водоразделами*, называется *речным бассейном* [7, 11, 16]. Речной бассейн состоит из поверхностного и подземного водосборов, границы которых не совпадают. Из-за сложности определения подземного водораздела за размер речного бассейна принимают площадь поверхностного водосбора.

*Водораздел* – условная топографическая линия на земной поверхности, разделяющая водосборы двух или нескольких рек, озер, морей или океанов и направляющая сток атмосферных осадков по двум противоположным склонам

Главный водораздел земного шара разделяет бассейны Тихого и Индийского океанов с одной стороны и Атлантического и Северного Ледовитого – с другой. Во влажных районах, как правило, весь речной бассейн дает сток, т.е. является водосбором. В засушливых районах часть речного бассейна может не иметь стока (обычно у транзитных рек) или служить областями внутреннего стока. Возможно также объединение смежных речных бассейнов в результате бифуркации рек, т.е. разделения русла реки и речной долины на две ветви, которые в дальнейшем не соединяются, образуют самостоятельные потоки и впадают в различные водоемы или речные системы.

Различают физико-географические и морфометрические характеристики бассейнов.

К *физико-географическим характеристикам бассейнов* относятся:

- географическое положение (географические координаты, близость к морям, пустыням, горным хребтам);
- климатические условия (атмосферные осадки, температура, дефицит влажности воздуха);
- геологическое строение и почвенный покров (трещиноватость горных пород, карстовые явления, механический состав грунтов, водопроницаемость почвы и др.);
- рельеф водосбора (уклоны поверхности земли, влияющие на скорость стекания воды);
- растительный покров (виды растительности, степень залесенности, выражаемая коэффициентом залесенности — отношением площади лесов к площади бассейна формула);
- озёрность бассейна, выражаемая коэффициентом озёрности.

К *морфометрическим характеристикам бассейнов* относятся:

- площадь, длина, средняя ширина бассейна;
- средняя высота бассейна;
- параметры формы речного водосбора (коэффициент асимметрии);

- круговой график бассейна;
- график нарастания площади водосбора;
- средний уклон поверхности бассейна и др.

Длиной бассейна ( $L$ , км) называют расстояние по прямой от замыкающего створа или устья главной реки до самой удалённой точки бассейна. При изогнутой форме бассейна прямая заменяется ломаной линией, каждый отрезок которой повторяет главные изгибы русла. Средняя ширина бассейна ( $B$ , м) равна площади бассейна ( $F$ , км<sup>2</sup>), делённой на его длину. Средний уклон бассейна определяют по уклонам между горизонталями – по отношению разности отметок горизонталей к среднему горизонтальному проложению между ними. Разность высот между истоком и устьем реки называется *падением реки*; отношение падения реки или отдельных ее участков к их длине называется уклоном реки (участка) и выражается в процентах (%) или в промилле (‰).

Бассейны рек имеют, как правило, вытянутую грушевидную форму – им присуще расширение примерно в средней части. Это объясняется особенностями строения речной системы.

Речная *долина* (рис. 2.1) – вытянутая пониженная форма рельефа разнообразного профиля с однообразным падением. Наиболее пониженная часть речной долины называется *руслом*, а часть дна долины, заливаемая высокими речными водами – *поймой*. Кроме того, долина имеет ряд *надпойменных террас* (обычно 2–3) (рис. 2.2).

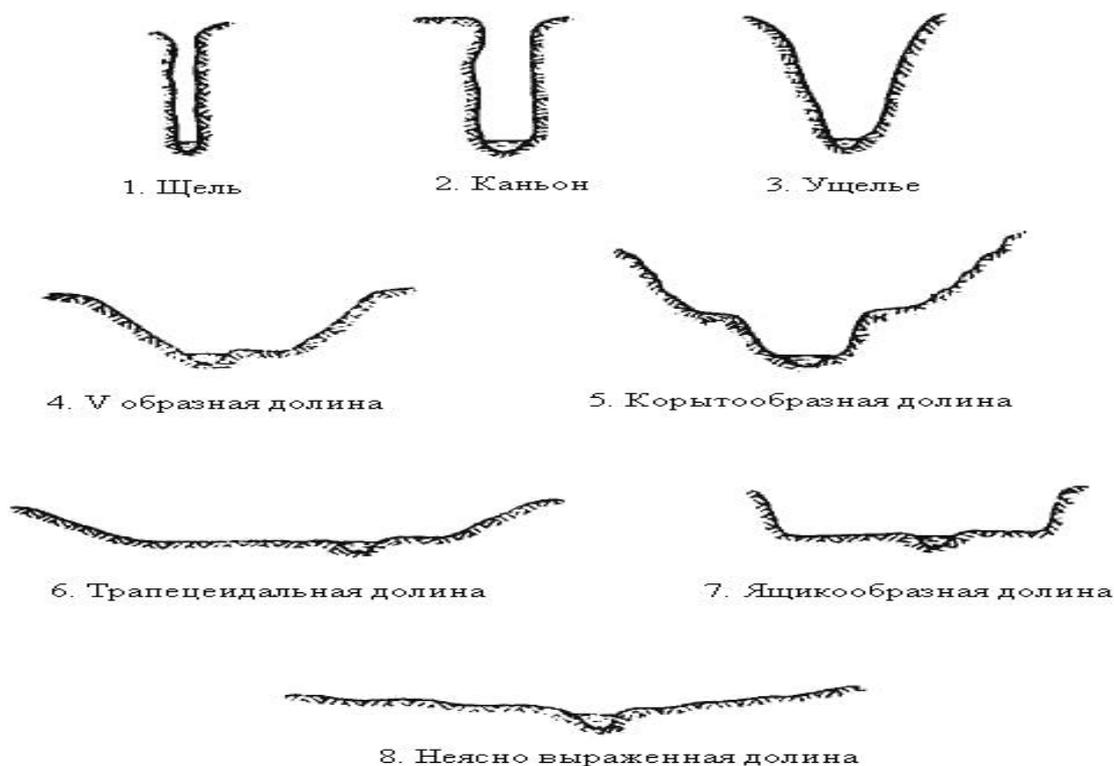


Рис. 2.1. Виды поперечных профилей речных долин

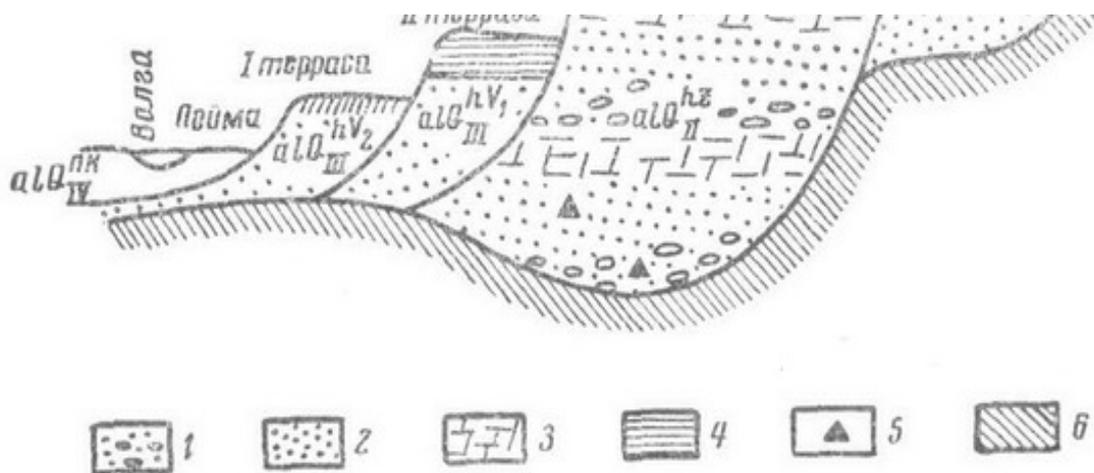


Рис. 2.2. Схема расположения и строения волжских террас в районе г.Сызрани (по объяснительной записке к временной стратиграфической схеме четвертичных отложений Прикаспийской низменности, 1951):

- 1 – аллювиальные пески с галькой; 2 – аллювиальные пески;
- 3 – суглинистые пойменные фации; 4 – раннехвалынские шоколадные глины;
- 5 – хазарская или волжская фауна млекопитающих;
- 6 – неоген и более древние отложения

*Речные террасы* представляют собой горизонтальные или слабо наклоненные поверхности на склонах речных долин, ограниченные уступами. Образованы размывающей и аккумулятивной деятельностью реки и сложены обычно *аллювиумом*. По происхождению они делятся на вложенные и наложенные террасы; по слагаемому материалу – на аккумулятивные, цокольные и коренные (рис. 2.3).

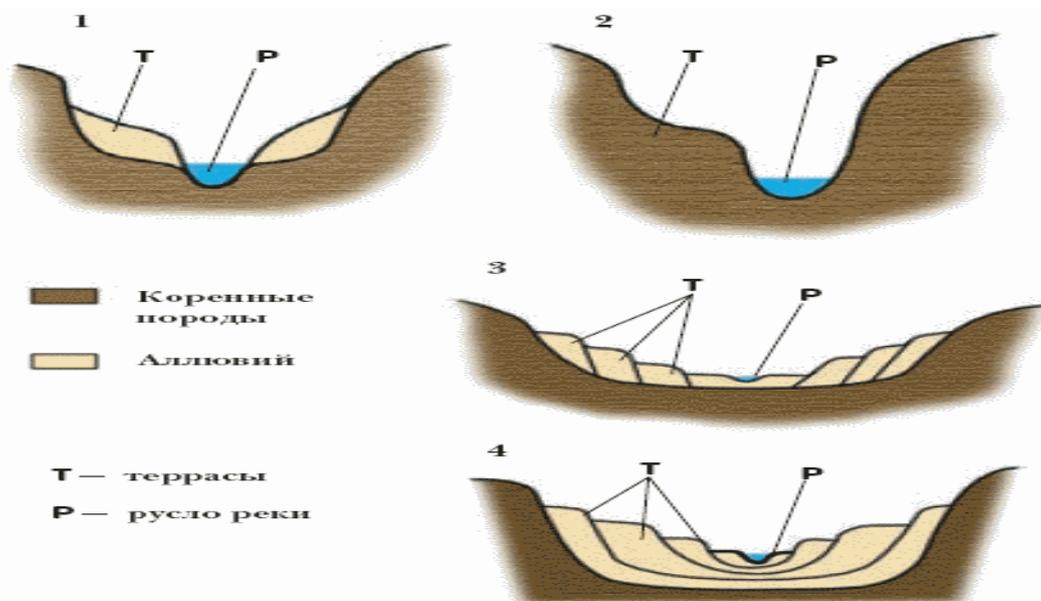


Рис. 2.3. Речные террасы:  
1 – аккумулятивная; 2 – эрозионная; 3 – наложенная; 4 – вложенная

*Русло* – наиболее пониженная часть долины, выработанная потоком воды, по которой осуществляется перемещение основной части донных наносов и сток воды в межпаводочные периоды.

Размеры и очертание эрозионных долин обусловлены различной сопротивляемостью размыву пород различного состава. Возникающие при этом изгибы речного потока называются *меандрами* (по названию очень извилистой реки в Древней Греции). Великанов М.В. выделяет несколько стадий развития меандров [4]:

1. Осевая линия потока близка к синусоиде.
2. Осевая линия постепенно переходит в ряд сопряженных между собой дуг окружности (если русло сложено легко размываемыми грунтами).
3. При последующем размыве вогнутого берега русло принимает вид петли.
4. Образование прорыва при сближении смежных петель (во время паводка); в результате уменьшается длина русла, и изменяются параметры движения.
5. Образование староречий (*стариц* – водоемов в пойме реки, удлинённых в плане, постепенно заиляющихся).

Старица возникает в результате отчленения участка речного русла при прорыве петли или разработки спрямляющей протоки.

Русла больших рек имеют ширину от нескольких метров до десятков километров (например, в низовьях Оби, Лены, Амазонки), при этом возрастание глубины русла по мере увеличения размеров реки происходит медленнее, чем увеличение ширины.

Существует классическая форма распределения глубин в меандрирующих руслах. Она характеризуется закономерным чередованием мелких (перекатов) и глубоких (плесов) участков потока (рис. 2.4) по длине.

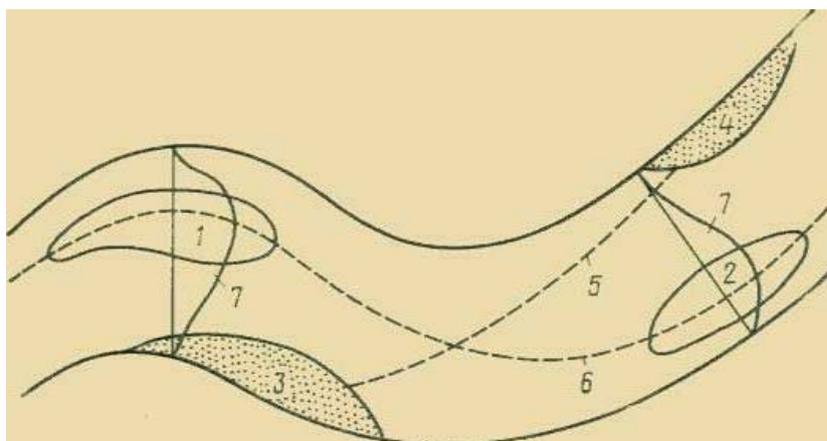


Рис. 2.4. Схема расположения руслового комплекса «плес – перекат – плес»:  
1 – верхний плес; 2 – нижний плес; 3 – верхний побочень;  
4 – нижний побочень; 5 – гребень переката; 6 – фарватер;  
7 – поперечные профили реки

*Перека́ты* представляют собой характерные для равнинных рек формы донного рельефа, в виде широкой гряды пересекающие русло под углом к общему направлению течения и вызывающие отклонение его от одного берега к другому. Перекат сложен обычно наносами. Он имеет вид вала: с пологим скатом, обращенным против течения, или с крутым скатом, обращенным по течению. Перекат часто встречается в местах расширения русла реки, близ устьев притоков. Над перекатами поток теряет свою энергию.

Глубоководный участок реки, находящийся между перекатами, называется *плесом*. Плёс обычно образуется там, где в половодье наблюдается местное увеличение скорости течения реки и интенсивно размывается ее дно (например, в изогнутых участках русла, в сужениях речной долины). Обычно плёс образуется в русле меандрирующей реки в вершине излучины у вогнутого берега.

На рис. 2.4 схематически показан перека́т 5 с гребнем, расположенный между плесами 1 и 2. Кривая, соединяющая нижнюю часть верхней плесовой ложбины 1 с верхней частью нижней плесовой ложбины 2, обозначает в плане положение фарватера 6. Плесы расположены у вогнутых берегов. У противоположных выпуклых берегов с некоторым смещением вниз расположены *отмели* 3 и 4, называемые *побочнями*. Обсыхающее в межень скопление донных наносов на выпуклом берегу речной излучины называется *речным пляжем*.

Извилистость рек и образование плесов и перека́тов тесно связаны с поперечной циркуляцией в потоке, в результате которой размывается вогнутый берег, а продукты размыва (наносы) откладываются на выпуклом берегу. Участок извилистого речного русла между двумя смежными точками перегиба его осевой линии называется *излучиной реки*. Форма и положение в плане излучин изменяются во времени под влиянием взаимодействия потока и русла, сопровождающегося изменением поля скоростей, размывами, транспортом наносов и их отложением.

В морфологии устьев рек, впадающих в реки, и устьев рек, впадающих в моря, существует большое различие, так как в первом случае происходит слияние двух водотоков, во втором – впадение водотока практически в неограниченное водное пространство, для которого характерны береговые течения, волнение, переформирование берегов и другие процессы.

Различают две основные *формы сопряжения речных потоков с морем*: дельты и эстуарии. Река, транспортирующая большое количество наносов, отлагает их при впадении в море. Накопление наносов способствует разветвлению русла, уменьшению его пропускной способности. *Многорукавное русло, формирующееся в собственных отложениях при впадении в море, называется дельтой*.

Дельты, как правило, представляют собой особую миниэкосистему, как на планете в целом, так и в бассейне конкретной реки. Несмотря на огра-

ниченные размеры (площадь всех дельт мира ненамного превышает 3 % площади суши, а на долю дельтовых берегов приходится около 9 % длины береговой линии Мирового океана), дельты обладают богатыми природными ресурсами (водными, земельными, биологическими), что делает их весьма перспективными для сельского и рыбного хозяйства, водного транспорта. Благодаря плодородным почвам и обилию влаги дельты рек в условиях теплого климата (Хуанхэ, Нила, Амазонки и пр.) стали местом зарождения земледелия и человеческой цивилизации в целом.

Наносы рек образуют за пределами устьев мелководные взморья, а часто и русловые формы в виде небольших островов, называемых *баррами*.

При малом содержании в реке наносов и приливных явлениях условия для образования дельты отсутствуют. Река впадает в море одним расширенным, размытым руслом, называемым *эстуарием*. Это воронкообразное затопляемое устье реки, расширяющееся в сторону моря. Образуется у рек, впадающих в моря, где сильно воздействие на устье реки приливов или других движений океанских вод. В северных районах эстуарии получили название губ (Обская губа). В пустынных районах образуется так называемое *сухое устье*.

### 2.1.3. Реки и их типы

**Река** – природный водный поток (водоток), текущий в выработанном им углублении – постоянном естественном русле – и питающийся за счет поверхностного и подземного стока с его бассейна. К рекам не относятся временные водотоки; водотоки, не имеющие водосбора (например, сформированные приливами реки приморских районов); каналы.

Реки классифицируют по нескольким показателям:

**1. По размерам:** в России принята следующая классификация рек по величине бассейна и протяженности:

*Большими реками* называются равнинные реки, имеющие бассейн площадью более 50000 км<sup>2</sup>, а также реки преимущественно горные с площадью водосбора более 30000 км<sup>2</sup>. Длина больших рек составляет более 500 км. Как правило, их бассейны располагаются в нескольких географических зонах, а гидрологический режим не свойственен рекам каждой географической зоны в отдельности.

*Средними реками* называются равнинные реки протяженностью 100...500 км, бассейны которых располагаются в одной гидрографической зоне и имеют площадь от 2000 до 50000 км<sup>2</sup>, а их гидрологический режим которых свойственен для рек этой зоны.

*Малыми реками* называются реки протяженностью до 100 км, бассейны которых располагаются в одной гидрографической зоне и имеют площадь не более 2000 км<sup>2</sup>. Гидрологический режим малых рек под влиянием местных факторов может быть не свойственен для рек этой зоны.

Водотоки протяженностью до 10 км, имеющие неустойчивый режим, принято называть ручьями.

**2. По местоположению речного бассейна:** в зависимости от рельефа местности, в пределах которой текут реки, они разделяются на горные и равнинные. На многих реках перемежаются участки горного и равнинного характера. Горные реки, как правило, отличаются большими уклонами, бурным течением, текут в узких долинах; преобладают процессы размыва. Для равнинных рек характерно наличие извилин русла, или меандр, образующихся в результате русловых процессов.

**3. По географическому местоположению** выделяют: таежные, тундровые, степные, ледниковые, болотные реки.

#### **4. По отношению к водному режиму**

Согласно классификации Б.Д. Зайкова выделяют три основные группы:

- 1) реки с весенним половодьем;
- 2) реки с половодьем в теплую часть года;
- 3) реки с паводочным режимом.

Для рек первых двух групп характерны ежегодно повторяющиеся примерно в одни и те же сроки большие подъемы воды и сравнительно низкая водность в остальное время года. Паводки большей частью редки и носят случайный характер.

#### **5. В зависимости от типа питания**

Речной сток формируется за счёт поступления в реки вод атмосферного происхождения, однако пути поступления вод в реки могут быть различными. Выделяют следующие *виды питания рек*: дождевое, снеговое, ледниковое и подземное (грунтовое).

*Дождевое питание* имеет преобладающее значение в тропических областях земного шара и в других районах с мягким тёплым климатом. Сток крупнейших рек мира (Амазонка, Ганг, Меконг) формируется в основном за счёт дождевых вод. Этот вид питания в глобальном масштабе является главнейшим.

Вторым по важности является *снеговое питание*. Его роль велика в питании рек в условиях умеренного климата, когда зимой накапливаются значительные запасы снега.

Третье место по объёму поступающих в реки вод занимает *подземное питание*. Именно подземные воды обуславливают постоянство или большую продолжительность стока реки в течение года. Около 1 % рек мира имеют *ледниковое питание*. Это, как правило, реки, берущие начало в горных районах.

У каждой реки доля отдельных видов питания различна. Определение этой доли – задача исключительно сложная. Наиболее точно её можно решить при использовании меченых атомов, т.е. путём радиоактивной маркировки вод различного происхождения.

Если тот или иной водный источник является явно преобладающим и его доля составляет более 80 % годового стока, то реки можно отнести к типу *с исключительно снеговым питанием* (дождевым, ледниковым или грунтовым). Реки, в питании которых это преобладание менее резко выражено, и доля одного из источников составляет от 50 до 80 % годового стока, можно причислить к водотокам *преимущественно снегового питания* (дождевого, грунтового или ледникового). Наконец, реки, в питании которых нет резкого преобладания какого-либо из источников питания, и доля каждого из них не превышает 50 % общего годового стока, можно считать водотоками *со смешанным питанием*.

Для краткости виды питания обозначают следующими символами: снеговое – Ss, дождевое – Rr, грунтовое – Uu и ледниковое – Gg, причем большими буквами пользуются в тех случаях, если доля того или иного вида питания превышает 50 %, а малыми – когда она менее 50 % годового стока. Буква «х» в условных обозначениях заменяет тот или иной второстепенный вид питания.

Например, обозначения типа питания расшифровывают следующим образом:

1. (S) – почти исключительно снеговое питание (снеговое питание составляет более 80 %).
2. (Sx) – преимущественно снеговое питание (> 50 %).
3. (R) – почти исключительно дождевое питание (дождевое питание составляет более 80 %).
4. (Rx) – преимущественно дождевое питание (> 50 %).
5. (Gx) – преимущественно ледниковое питание.
6. (sx) – смешанное питание (преобладает снеговое).
7. (rx) – смешанное питание (преобладает дождевое).
8. (gx) – смешанное питание (преобладает ледниковое).
9. (ux) – смешанное питание (преобладает грунтовое).

Большая часть рек территории бывшего СССР имеет преобладающее снеговое питание. Почти исключительно снеговое питание имеют реки Северного Кавказа и Заволжья. Реки дождевого питания характерны для южной части территории к востоку от Байкала; для Черноморского побережья Кавказа и Крыма; для бассейнов Яны и Индигирки. Ледниковое питание имеют реки на Кавказе и в Средней Азии.

**6. По характеру ледового режима** реки можно разделить на следующие основные группы:

- 1) реки с *ежегодным устойчивым ледоставом* различной длительности. К этой группе принадлежит подавляющее большинство рек;
- 2) реки с *неустойчивым ледоставом*, наблюдающимся не ежегодно. Сюда принадлежат реки крайних западных и южных районов Европейской

части России и Северного Кавказа – Неман, Висла, Днестр, Кубань и др., а также многие водотоки юга Приморья на Дальнем Востоке;

3) реки, на которых *наблюдаются ледовые явления* (шуга, забереги и т.д.), но ледостав отсутствует. К этой группе принадлежит большинство рек Кавказа и горных областей Средней Азии и Алтая; реки эти в литературе носят название *шугоносных*;

4) реки, на которых *ледовые образования вообще отсутствуют* в силу теплого климата. К ним относятся водотоки сравнительно небольших районов – Колхидской и Ленкоранской низменностей на Кавказе, ряд рек на юге Туркмении и в Средней Азии.

**7. По русловым процессам** (устойчивости русла): *устойчивые и неустойчивые*.

Существуют различные типы русловых процессов. Среди них основные: *меандрирование, русловая многорукавность, пойменная многорукавность* (разветвленное русло) и др. Также существуют различные промежуточные и крайние проявления русловых процессов.

Для многих типов русловых процессов выявлены закономерные схемы развития речных русел. Например, при меандрировании – смещение излучин, при русловой многорукавности – смещение вниз по течению русловых островов, при пойменной многорукавности – разработка, развитие и отмирание пойменных протоков.

Отнесение конкретного участка реки к соответствующему типу русловых процессов помогает дать прогноз деформаций русла.

#### 2.1.4. Поперечный и продольный профили реки

**Поперечным профилем** реки называют вертикальный разрез речного русла в створе (в поперечном сечении реки) плоскостью, перпендикулярной направлению течения. Форма поперечных профилей рек отличается большим разнообразием. Так, на плесовых участках профиль дна реки *асимметричный*. Вертикаль с наибольшей глубиной смещена ближе к вогнутому берегу (см. рис. 2.4). Это объясняется возникновением поперечной циркуляции под действием центробежной силы, под влиянием которой образуется поперечный уклон поверхности воды, который может быть соизмерим с продольным уклоном.

*Поперечный уклон* поверхности воды возникает и под влиянием отклоняющей силы вращения Земли. Движущаяся в реках вода отклоняется в северном полушарии вправо, а в южном влево. Следовательно, линия поверхности воды в поперечном сечении реки имеет наклон, кроме очень редких случаев, когда на криволинейных участках реки центробежная сила и отклоняющая сила вращения Земли при алгебраическом сложении дают нуль. С течением времени такой процесс приводит к созданию несиммет-

ричных форм русла с подмытым и крутым правым берегом, отмелым и пологим левым.

**Продольным профилем** реки принято называть вертикальный разрез речного русла вдоль фарватера. На нём показываются совмещённые кривые отметок дна и уровней воды, измеренных одновременно в нескольких сечениях (створах) реки в абсолютных отметках. Продольный профиль обычно изображают в различных горизонтальном и вертикальном масштабах, которые могут отличаться в тысячи раз.

Продольный профиль характеризуется *изменением глубины* по длине реки. Кроме того, на продольном профиле видны *изменения характерных уровней воды*, например, летнего и весеннего. При построении продольного профиля поверхности воды за основу принимаются меженные (нижние) уровни.

На основании обобщения топографических и гидрометрических данных по многим рекам установлены главные *типы продольных профилей дна рек*:

1. *Вогнутый* – с уменьшением уклона дна от истока к устью реки. Этот профиль встречается чаще всего и носит название профиля равновесия реки. Он образуется в результате наступления равновесия между эрозией, транспортом и аккумуляцией наносов при стабильном базисе эрозии. Фактически полного равновесия между указанными процессами не наблюдается, поэтому само понятие «профиль равновесия» до некоторой степени условно. Профиль равновесия можно рассматривать как предельную форму продольного профиля дна, к которому стремится река.

2. *Прямолинейный* – наблюдающийся чаще всего у малых рек.

3. *Выпуклый* – при увеличении уклона дна от истока к устью реки. Этот профиль встречается сравнительно редко.

### 2.1.5. Уровенный режим

Непрерывное изменение притока воды в реку приводит к колебанию расходов воды (количество воды протекающее через створ в единицу времени) и соответствующих им уровней воды. В общем случае увеличению расхода воды соответствует повышение уровня. Меняет при этом своё положение и линия пересечения поверхности воды в русле с берегом (*урез воды*).

Взаимосвязь расходов и уровней, изображённая графически в прямоугольных координатах, называется **кривой расходов**. Если по всей амплитуде колебаний расходов каждому его значению соответствует единственное значение уровня, то связь между расходами и уровнями является однозначной. Однозначная связь между расходами и уровнями соответствует равномерному установившемуся движению воды в недеформируемом русле, чего в естественных реках не бывает. В естественных руслах строят

кривую расхода с паводочной петлёй, которая показывает, что при одном и том же уровне в период подъёма уровня наблюдается больший расход, чем на спаде.

### 2.1.6. Гидрологический режим рек

В понятие «*гидрологический режим*» входят:

- водный режим;
- термический и ледовый режимы;
- русловой режим.

#### Водный режим рек

**Водным режимом** называется изменение во времени уровней, расходов и объёмов воды в водных объектах. Изучение для различных рек хронологических графиков изменения расходов и уровней воды в данном сечении за многие годы позволяет выделить характерные периоды повышенных и пониженных расходов воды и установить последовательность их чередования. Объём годового стока реки может изменяться от года к году, но характерные периоды (фазы) режима в основном сохраняются. Под **фазами водного режима рек** понимают характерные состояния водного режима реки, повторяющиеся в определённые гидрологические сезоны в связи с изменением условий питания. Основными фазами водного режима реки являются половодье, паводок и межень.

*Половодье* – ежегодно повторяющееся в один и тот же сезон значительное увеличение водоносности реки, возникающее в результате таяния снега и вызывающее на длительный срок подъем уровня реки и выход воды из русла. Для внутриконтинентальных территорий половодье связывают со снеготаянием, но правильнее было бы его связывать с главным источником питания. Например, в муссонных и тропических зонах половодье обусловлено летними дождями.

*Паводки* – внезапные кратковременные и нерегулярные подъемы уровня воды в реках, возникающие в результате обильных дождей или снеготаяния во время оттепелей.

*Межень* – период малой водности и низких уровней воды во время сухой или морозной погоды, когда река питается лишь грунтовыми водами. Различают летнюю и зимнюю межень.

На режим влияют падение и уклон реки.

#### Термический и ледовый режимы рек. Ледовые явления

**Термический режим рек** (временные изменения температуры воды в реке) обусловлен метеорологическими факторами: изменением радиационного баланса, температуры воздуха.

В условиях умеренного климата наиболее типичны *сезонные изменения* температуры воды в реках. Зимой под ледяным покровом вода у поверхности реки имеет температуру около 0°C. Весной в период повышения температуры воздуха и осенью в период ее понижения изменения температуры воды следуют с некоторым отставанием за изменениями температуры воздуха.

Максимальная температура воды по величине меньше максимальной температуры воздуха и наступает несколько позже максимальной температуры воздуха. В связи с тем, что температура воды в реках, как правило, не может приобретать отрицательные значения, средняя годовая температура воды в реках заметно выше, чем средняя годовая температура воздуха.

Температура воды в реке изменяется по глубине водотока. Летом у дна температура воды ниже, чем на поверхности, а у берегов выше, чем в середине. Осенью у берегов температура воды оказывается немного ниже, чем в остальной части поверхностного сечения потока.

Кроме сезонных колебаний температура воды в реках испытывает и *суточные колебания*, которые также отстают от изменений температуры воздуха. Минимальная температура воды наблюдается обычно в утренние часы, максимальная – в 15–17 часов (максимум температуры воздуха наступает на 1–2 часа раньше). На больших реках суточный ход температуры воды обычно не более 1–2 °C, на малых реках он может быть выше.

Температура воды имеет также *пространственные изменения*. Температура воды крупных рек, тянущихся в меридианальном направлении, подчиняется широтной зональности. У таких рек наибольшее различие температуры вдоль реки наблюдается в период нагревания. Для больших рек, текущих с юга на север, характерны большие контрасты между температурой воды и воздуха: летом нагревшаяся в южных широтах речная вода попадает в северных широтах в условия более холодного климата. Часто температура воды в реках изменяется ниже впадения крупных притоков. В летнее время температура воды существенно уменьшается по течению ниже водохранилищ, что объясняется поступлением в нижние бьефы гидроузлов глубинных вод из водохранилищ, имеющих пониженную температуру. Часто температура воды заметно возрастает в местах сброса отработанных вод промышленных предприятий и тепловых электростанций. В этом случае возникает так называемое «тепловое загрязнение» вод.

Вследствие турбулентного перемешивания температура воды в реках изменяется мало. На реках с быстрым течением различия составляют 0,1 °C, на реках с медленным течением – 1–2 °C.

**Зимний режим рек** и условия его протекания зависят от географического положения и климата бассейна реки. Все реки по характеру ледового режима делятся на три большие группы: замерзающие, с неустойчивым

ледоставом, незамерзающие. Реки юга страны не замерзают совсем или замерзают на короткий срок. Реки средней полосы России замерзают на несколько месяцев. Наиболее долго скованы льдом реки бассейна Северного Ледовитого океана – до 8 месяцев. Реки в условиях умеренного климата зимой, как правило, замерзают. На таких реках выделяют три характерных периода:

- 1) замерзания (осенних ледовых явлений);
- 2) ледостава;
- 3) вскрытия (весенних ледовых явлений).

Когда температура воды снижается до 0 °С, начинаются ледовые явления [4, 5, 11]. **Ледовые явления** – элементы ледового режима рек, озер, водохранилищ, характеризуют состояния водных объектов с точки зрения ледового режима, фазы возникновения, развития и исчезновения различных видов льда. С точки зрения изучения ледовых явлений наиболее интересны замерзающие реки.

Обычно к ледовым явлениям относят также **ледяные образования**, представляющие собой формы существования льда в водных объектах. Но все-таки целесообразнее разделять ледовые явления и ледовые образования. Ледовые образования, это например – *шуга, ледяной покров, льдины и ледяные поля*; ледяные явления, соответственно – *шугоход, ледостав, ледоход*.

Начальная фаза осенних ледовых явлений – образование **сала** (плавающих кусков ледяной плёнки, состоящих из кристалликов льда в виде игл). В средней полосе России сало обычно плывёт по реке 3–8 дней. Почти одновременно у берегов, где скорости течения меньше, образуются **забереги** – узкие полосы неподвижного льда. По мере охлаждения всей массы воды в ней начинает образоваться **внутриводный лёд (шуга)**. Непременное условие образования шуги – переохлаждение воды на поверхности или у дна и наличие в воде ядер кристаллизации.

Т а б л и ц а 2 . 1

Классификация шуговых явлений

Количество шуги в % от живого сечения водотока	Период шугохода $T_{ш}$ в днях	Характеристика шуговых явлений	Оценка шуговых явлений в баллах
до 25	до 3	Без образования шуговых ковров, шуга транспортируется только в верхнем слое воды	1
от 25 до 50	до 7	Образование шуговых ковров, транспортирование шуги в верхней половине живого сечения	2
от 50 до 70	более 7	Образование шуговых ковров, заполнение живого сечения потока внутриводным льдом	3

**Ледяной покров** на реках и водоёмах вначале возникает на мелководье: у берегов, в заливах, а затем по мере охлаждения воды начинается образование льда на водной поверхности вдали от берегов. В процессе образования льдин участвуют скопления сала, шуги и снежуры (скопления только что выпавшего на воду снега). Далее начинается *осенний ледоход*, который на больших реках продолжается 10–12 дней, на малых – до 7 дней.

По мере увеличения числа плавающих льдин и их размера скорость движения ледяных полей уменьшается. В местах сужения русла, у островов, в мелких рукавах ледяные поля останавливаются и смерзаются. Этому могут способствовать **заторы** – закупорки русла плавающими льдами. Образуется сплошной ледяной покров – **ледостав**. Для малых рек характерно наступление ледостава без осеннего ледохода путём расширения и смерзания заберегов. Некоторые участки реки под воздействием динамических или термических факторов могут не замерзать продолжительное время или совсем: на порогах или быстринах, в нижних бьефах гидроузлов, в местах выходов в реку относительно тёплых подземных вод, в местах выпуска тёплых условно чистых и сточных вод.

Ледяные явления делятся на 3 группы: периоды осенних ледовых явлений, ледостава и весенних ледовых явлений.

### **Ледовые явления и ледовые образования периода осенних ледовых явления (периода замерзания)**

К ледовым образованиям этого периода относятся забереги, сало, шуга и др.

*Зажор льда* – скопление шуги с включением мелкобитого льда в русле водотока:

- вызывает стеснение (закупорку) водного сечения;
- приводит к подъёму уровня воды и затоплению прибрежных участков;
- возникает перед ледоставом, обычно формируется ниже порогов.

*Снежура* – скопление снега, плавающего в воде:

- образуется при обильном выпадении снега на охлажденную воду;
- быстро смерзается в плотный эластичный покров сравнительно большой толщины.

*Блинный лед* – плавающие льдины округлой формы диаметром от 0,5 до 3 м, имеющие по краям валик из измельченного льда. Образуется при смерзании сала, шуги и мелких льдин.

*Битый лед* – плавающие льдины неправильной формы. Различают крупный (от 20 до 100 м) и мелкий (от 2 до 20 м) лед и куски льда от 0,5 до 2 метров.

*Ледяная каша* – скопление мелкораздробленного льда с включениями снежуры, сала и шуги.

*Ледяные поля* – льдины размером более 100 метров по наибольшему измерению.

*Ледяные валы* – ледяные образования в виде гряд, сложенных из шуги и битого льда вдоль берегов. Достигают высоты 1 метра.

*Ледяные перемычки* – короткий участок ледяного покрова, образующийся в местах смыкания заберегов или вследствие смерзания плывущих льдин и шуги.

*Пятры* – скопления донного льда, выросшие до поверхности воды.

Ледовые явления этого периода:

*шугоход* – движение шуги на поверхности и внутри водного потока;

*осенний ледоход* – движение льдин и ледяных полей на реках и озерах под действием течения, ветра, температуры воды; различают весенний и осенний ледоходы.

### **Ледовые явления и ледовые образования периода ледостава**

*Ледяной покров* – лед в виде сплошного неподвижного покрова на поверхности водных объектов.

*Торосы* – нагромождение льдин, на ледяном покрове образующееся в результате подвижек и сжатия ледового покрова.

*Ледяной мост* – опирающийся на оба берега участок ледяного покрова реки, отделившийся от водной поверхности при резком падении уровня реки.

*Полынья* – пространство с открытой водной поверхностью в ледяном покрове.

*Трещины* – разрывы в ледяном покрове, образовавшиеся под влиянием колебания температуры воздуха, уровня воды, подвижек льда и других причин.

*Наледь* – нарост льда, возникший при замерзании грунтовых вод, излившихся на поверхность, или выхода речных вод на поверхность ледяного покрова.

*Промерзание реки* – все сечение реки до дна занято сплошным льдом.

*Шуговая дорожка* – часть ледяного покрова, образовавшаяся из смерзшейся шуги в виде продольной полосы между заберегами.

*Снежица* – вода на льду, образовавшаяся в результате таяния снега при длительных оттепелях.

Толщина ледяного покрова на реках в течение зимы постепенно увеличивается. Интенсивность нарастания льда падает с появлением на нём снежного покрова. За период ледостава прослеживается закономерность: чем толще снежный покров, тем тоньше лёд. Оценку нарастания льда на реках можно осуществлять с учётом эмпирической связи толщины льда с

суммой отрицательных температур воздуха, например, по формуле Ф.И. Быдина:

$$h_{\text{л}} = 2\sqrt{\sum|-T|}, \quad (2.1)$$

где  $\sum|-T|$  – сумма среднесуточных температур воздуха за период ледостава.

Толщина льда на реках юга европейской части России не превышает 20–40 см, на севере – 1,0 м. На реках Сибири толщина льда достигает 1,5–2,0 м. Малые реки этого региона нередко промерзают до дна. Иногда промерзают и крупные реки – Яна, Индигирка.

### **Ледовые явления и ледовые образования периода весенних ледовых явлений**

С наступлением весны ледяной покров начинает разрушаться. На этот процесс влияют солнечная радиация, поступление теплоты из воздуха и с тёплыми водами, механическое воздействие текущей талой воды.

Сначала начинает таять снег на льду и у берегов. У берегов под воздействием нагревания грунта, стекания со склонов талых вод и повышения уровня воды в реке образуются полосы чистой воды – *закраины*. Продолжительный подъём воды приводит лёд в движение: возникают подвижки льда, смещения ледяных полей, а затем начинается весенний ледоход.

*Закраины* – полосы открытой воды вдоль берегов, образующиеся перед вскрытием в результате таяния льда, повышения уровня воды и усилившегося притока грунтовых вод.

*Лед подняло* – всплытие и отделение от берегов ледяного покрова без разламывания при повышении уровня воды (если без отрыва от берегов – лед вспучило).

*Вода на льду* – скопление стоячей воды на льду, образуется в результате таяния снега или за счет воды, поступившей из-под ледяного покрова.

*Вода течет поверх льда* – вдоль берегов или по всей поверхности льда. Явление характерно для промерзающих рек при наледях, во время оттепелей.

*Подвижка льда* – небольшие перемещения ледяного покрова на отдельных участках реки, происходящее под действием течения, ветра, повышения уровня.

*Затор* – нагромождение льда в русле реки, вызывающее стеснение живого сечения и подъем уровня воды.

*Лед растаял на месте* – река очистилась ото льда без ледохода.

*Чисто* – состояние водной поверхности после освобождения от ледяных образований.

*Наслуд* – лед, образовавшийся при замерзании талых вод на ледяном покрове.

*Разводье* – пространство открытой воды, образующееся в ледяном покрове в результате подвижек льда.

*Навалы льда* – нагромождения льда, часто в виде валов на берегах и в поймах рек, образовавшиеся во время ледохода.

*Остаточные забереги* – полосы льда, оставшиеся весной у берегов при разрушении ледяного покрова.

*Вскрытие рек* начинается с низовьев и распространяется вверх по течению. На текущих с севера на юг больших реках вскрытие происходит в основном под влиянием термических факторов, несколько опережает волну весеннего половодья и происходит относительно спокойно (Дон, Днепр, Волга). На реках, текущих с юга на север, вскрытие рек протекает более бурно (Енисей, Лена). Здесь главным фактором становится динамический – воздействие текущих талых вод. Ледоход по времени совпадает с половодьем, идёт очень бурно, часто сопровождается заторами, чему способствует более позднее вскрытие рек в низовьях. Заторы приводят к значительному повышению уровня рек и даже к наводнениям.

На малых реках ледяной покров часто тает на месте и весеннего ледохода не наблюдается.

Отдельные элементы ледового режима рек относятся к числу опасных и нежелательных природных явлений.

## 2.2. Речной сток

### 2.2.1. Факторы стока

Под речным стоком [7, 15] понимают перемещение воды в виде потока по речному руслу, которое происходит под действием гравитации. Сток является важнейшим элементом круговорота воды в природе, с помощью которого происходит перемещение воды с суши в океаны или области внутреннего стока. Количественное значение стока в единицу времени называется *расходом воды*.

Под речным стоком подразумевается также объем стока – объем воды (или минеральных веществ, твердый сток), прошедшей через определенный створ в единицу времени, чаще всего год. Объединяет поверхностный сток (образующийся в результате осадков и снеготаяния) и подземный сток, формирующийся за счет грунтовых вод. Речной сток за год является объективным показателем для определения полноводности реки.

Поступление воды в реки в течение года крайне неравномерное и зависит от климатических условий. По определению А.И. Воейкова, «река есть продукт климата». Да и анализ кругооборота воды в природе позволяет считать основными факторами, влияющими на речной сток, **климатиче-**

**ские факторы:** осадки; температуру воздуха, почвы и воды; скорость и направление ветра; влажность воздуха; испарение [11, 9].

С инженерной точки зрения при изучении осадков представляют интерес количество осадков  $x$  и продолжительность их выпадения  $t_x$ . Среднее количество атмосферных осадков (мм), выпадающих в 1 мин за отдельный дождь (снегопад), на водонепроницаемую горизонтальную поверхность называют **интенсивностью выпадения осадков**  $i_x$ . По характеру выпадения осадков различают ливневые, обложные и морозящие дожди.

Ливневые осадки выпадают в виде дождя, снега, града, крупы и мокрого снега. Они образуются при быстром подъёме воздушных масс с водяными парами вверх и отличаются большой интенсивностью ( $i_x > 0,3$  мм/мин), сравнительно коротким сроком выпадения и небольшой площадью распространения.

Ливневые осадки, обуславливающие дождевые паводки на реках, играют важную роль в процессе формирования стока рек. Максимальные расходы дождевых паводков достигают больших значений, а на малых реках могут превысить максимальные расходы от снеготаяния.

Обложные осадки, выпадающие в виде дождя и снега, образуются при медленном подъёме тёплых воздушных масс. Для них характерны невысокая интенсивность, длительный период выпадения и большие площади распространения. Обложные осадки дают большой сток, но максимальные расходы от них меньше, чем от ливней, что объясняется их растянутостью во времени.

Морозящие осадки, состоящие из мелких частичек воды или снега, характеризуются очень медленным выпадением на землю. Как правило, они весьма мало сказываются на стоке рек.

Средний слой осадков для Земного шара за год составляет 1130 мм. Разница в величине слоя осадков для различных районов Земного шара значительна: так, в некоторых районах Индии годовой слой осадков достигает 15 тыс. мм, тогда как в пустынных областях Африки он не превышает 10 мм.

Количественные характеристики осадков могут быть представлены в виде месячных, годовых и среднемноголетних значений. Их получают непосредственно на метеорологических станциях в виде таблиц, составленных по данным наблюдений.

**Испарение** с поверхности речного бассейна включает в себя испарение с поверхности водоемов, находящихся на его территории, с поверхности снежного покрова и льда и испарение с почвы, включая транспирацию растений. Наблюдения над испарением с водной поверхности проводятся с помощью специальных приборов (испарителей и испарительных бассейнов) на водоиспарительных станциях.

Помимо климата на речной сток влияют **географические факторы**: *величина и форма бассейна реки; его геология и рельеф; почвы; озёра; болота; ледники; направление течения реки; растительность.*

**Рельеф** речных бассейнов определяется совокупностью форм земной поверхности, высотным их расположением, степенью расчлененности и изрезанности, крутизной и экспозицией склонов, уклонами водных потоков. Влияние рельефа поверхности водосбора на сток проявляется различно. Наличие крупных форм рельефа способствует увеличению скорости стекания воды по поверхности водосбора, а при больших уклонах интенсифицируется развитие гидрографической сети. В то же время плоский, равнинный рельеф способствует увеличению водоудерживающей способности бассейна: при одинаковых прочих условиях фильтрация больше в равнинных бассейнах по сравнению с горными. В общем случае непосредственное влияние рельефа (уклонов и длины склонов) на речной сток ощутимо при малых площадях водосборов, нивелируясь при их увеличении.

Влияние **почвенного покрова** речного бассейна на сток зависит от водопропускных и водоудерживающих свойств почв, которые определяют процессы фильтрации и испарения воды, поступающей на водосбор в виде осадков. При изучении влияния почв прежде всего исследуют физико-механические и физико-химические характеристики почв, их структуру и характер сельскохозяйственной обработки.

**Геологическое строение** речного бассейна оказывает значительное влияние на величину поверхностного стока и грунтового питания реки, определяя условия накопления и расходования подземных вод. Наиболее важными факторами формирования стока являются литологический состав пород, характер их залегания и глубина водоупоров. Наличие мощных слоев хорошо водопроницаемых, рыхлых или трещиноватых пород, являющихся аккумуляторами влаги, обуславливает более равномерный сток и увеличение грунтового питания. В областях распространения закарстованных горных пород поверхностный сток обычно отсутствует. Атмосферные осадки, поглощенные карстовыми воронками и просочившиеся в трещины, существенно увеличивают запасы подземных вод, способствуя зарегулированности стока.

Непосредственное влияние **растительности** на сток сравнительно невелико. Растительный покров, увеличивая шероховатость земной поверхности, создает условия для лучшего просачивания воды в почву.

Важнейшая водоохранная **функция лесов** связана с их сглаживающим влиянием на внутригодовое распределение стока. Лес обеспечивает перевод части склонового стока в почвенный и грунтовой, что связано с очисткой воды от загрязняющих веществ в ходе фильтрации. Снежный покров на лесных территориях формируется со значительно большими запасами воды, чем на открытых пространствах, причем наиболее мощный – в лист-

венных лесах. Следует иметь в виду, что распространение лесов и сток в естественных условиях тесно связаны с климатом. Для малых водосборов при одинаковых размерах бассейнов, одинаковых климатических и геологических условиях с увеличением лесистости происходит уменьшение стока. Это связано с тем, что в лесных бассейнах влага попадает в речную сеть почти исключительно подземным путем. Малые реки, имеющие незначительную глубину вреза русла, обычно не получают подземного питания. По мере увеличения глубины эрозионного вреза на больших водосборах большая часть просачивающихся вод попадает в речную сеть бассейна в связи с усилением дренирующей роли реки. Поэтому различия в стоке с увеличением площади водосборов безлесных и лесистых районов постепенно сглаживаются.

**Влияние болот** на сток согласно многочисленным исследованиям может быть как положительным, так и отрицательным. С одной стороны, благодаря большой влагоемкости болото способно аккумулировать значительный объем воды. Но вследствие малой водоотдачи торфа, а также низкого расположения болот накопленная вода тратится на испарение, особенно в теплое время года. Осушение болот способствует некоторому увеличению поверхностного стока и понижению уровня грунтовых вод.

**Озера** являются мощными регуляторами стока, способствуя растягиванию половодья и уменьшению максимальных расходов воды в период половодья и повышению стока в маловодные сезоны года. Регулирующая способность озер зависит от места их нахождения, оказывая больший регулирующей эффект при расположении в нижнем течении водотоков.

В последнее время всё более усиливается влияние **антропологических факторов**: *регулирование речного стока; снегозадержание; посадка лесополос; осушение болот; вырубка лесов и др.*

Естественные леса и искусственные лесонасаждения способствуют снегозадержанию, переводу поверхностного стока в подземный, а снегозадержание, строительство прудов, глубокая распашка почвы несколько уменьшают размеры годового стока.

### 2.2.2. Характеристики стока

Согласно Своду правил по проектированию и строительству «Определение основных расчётных гидрологических характеристик» (СП 33-101–2003) [15] к основным гидрологическим характеристикам реки относятся:

- расход воды  $Q$ , м<sup>3</sup>/с;
- объем стока воды  $W$ , м<sup>3</sup>;
- модуль стока воды  $q$ , м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>).
- слой стока воды  $h$ , мм;
- уровень воды  $H$ , м.

*Расход воды*  $Q$  – количество воды, проходящее через поперечное сечение реки (речной створ) в единицу времени,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

*Объём стока*  $W$  – количество воды, проходящее через речной створ за определённый промежуток времени, например, за год, месяц и т.д., млн  $\text{м}^3/\text{год}$ ,  $\text{км}^3/\text{год}$ .

*Слой стока*  $y$  – количество воды, проходящее через речной створ за определённый промежуток времени, отнесённое к единице площади водосбора, мм.

*Модуль стока*  $q$ ,  $M$  – количество воды, проходящее через речной створ за одну секунду, отнесённое к площади водосбора,  $[M] = \text{л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ ,  $[q] = \text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ .

*Коэффициент стока*  $\eta$  – отношение высоты слоя стока к высоте выпавших за тот же период осадков:

$$\eta = \frac{y}{x}. \quad (2.2)$$

Средние значения годового стока за многолетний период, включающий несколько полных (не менее двух) циклов колебаний водности реки при неизменных географических условиях и одинаковом уровне хозяйственной деятельности в бассейне реки, называют нормой стока. *Норма стока* – среднемноголетнее значение какой-либо характеристики стока, для её обозначения применяют индекс «0», например:

$$Q_0 = \frac{\sum Q_i}{n}, \quad W_0 = \frac{\sum W_i}{n}. \quad (2.3)$$

Практически за норму гидрологических характеристик принимается среднее значение, определённое по ряду длительностью 40...60 лет. Норма стока является основной гидрологической характеристикой, которую используют при определении других характеристик стока, например годовых величин разной обеспеченности, сезонных и месячных величин стока и т.д. Норма стока имеет важное значение при проектировании гидротехнических сооружений, водохранилищ, систем водоснабжения и других видов водохозяйственного строительства.

Принято считать, что норма стока является устойчивой величиной, будучи обусловленной устойчивостью среднемноголетних осадков и испарения, т.е. средняя арифметическая величина стока, вычисленная за достаточно длительный период наблюдений, остаётся постоянной независимо от прибавления к многолетнему ряду новых членов.

*Модульный коэффициент*  $k$  – отношение характеристики стока к норме этой величины:

$$k = \frac{Q_i}{Q_0} = \frac{W_i}{W_0} = \frac{M_i}{M_0} = \frac{y_i}{y_0}. \quad (2.4)$$

Между характеристиками стока существуют следующие соотношения:  
Годовой слой стока, мм:

$$y_{\text{год}} = 31,5M_{\text{ср.год}} = \frac{31500Q_{\text{ср.год}}}{F}, \quad (2.5)$$

где  $F$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>.

Среднегодовой модуль стока, л/(с·км<sup>2</sup>):

$$M_{\text{ср.год}} = 0,032y_{\text{год}} = \frac{10^3 Q_{\text{ср.год}}}{F}. \quad (2.6)$$

*Максимальным стоком (высоким стоком)* называют объём или слой стока за время прохождения основной волны половодья или за период наибольшего дождевого паводка.

*Минимальным стоком (низким стоком)* называют наименьший сток рек, наблюдающийся в межень (летнюю или зимнюю).

### 2.2.3. Методы изучения гидрологического режима водотоков и определения расчетных характеристик стока

Гидрологические расчеты являются одним из основных разделов инженерной гидрологии. Этот раздел как бы объединяет многие теоретические и экспериментальные исследования в области гидрологии с широкой инженерно-строительной и водохозяйственной практикой.

В **задачи гидрологических расчетов** как научной дисциплины входит разработка методов, позволяющих рассчитать величины различных характеристик гидрологического режима водотоков. При этом основную группу задач составляют расчеты стока воды: нормы годового стока, внутригодового распределения стока, максимальных расходов половодий и паводков, гидрографов половодий и паводков, минимальных расходов воды.

При изучении гидрологического режима водотоков и определении расчетных характеристик стока используют **методы гидрометрический, научных гидрологических обобщений, лабораторного и математического моделирования.**

**Гидрометрический метод** определения гидрологических характеристик основан на статистической обработке рядов длительных гидрометрических наблюдений, проводимых на сети гидрометеорологических станций и постов. Он широко используют во многих странах с малыми территориями, где возможно создание густой сети наблюдений, охватывающих большую часть водотоков.

В условиях громадной территории нашей страны большее распространение при изучении режима и определении расчетных гидрологических характеристик стока получил **метод научных гидрологических обобщений**, при котором используют материалы наблюдений опорной сети гид-

рометеорологических станций и экспериментальных исследований региональных водно-балансовых (стоковых) станций. Основу метода составляют глубокий *генетический анализ среды*, в которой формируется сток, и анализ отдельных процессов и факторов, определяющих его качественные и количественные характеристики. В современных условиях генетический метод исследования гидрологических явлений тесно сочетается со *статистическим*, включающим в себя комплекс исследований, осуществляемых для выяснения вероятностных закономерностей, проявляющихся в гидрологических процессах. Совместное использование генетического и статистического методов в научных гидрологических обобщениях является наиболее перспективным путем решения задач гидрологических расчетов.

Решение многих задач статистической гидрологии было бы невозможно без использования электронно-вычислительных машин. Внедрение в практику гидрологических расчетов ЭВМ привело к широкому распространению метода **математического** (кроме лабораторного) **моделирования** гидрологических процессов, естественный ход которых заменяется разработанной теоретической моделью.

Сочетание сетевых, полевых экспериментальных исследований, лабораторного и математического моделирования и экспедиционных обследований при широком применении **методов математической статистики** в научных гидрологических обобщениях позволяет глубже раскрывать сущность сложных процессов формирования речного стока и совершенствовать методы определения характеристик стока.

*Методы теории вероятности и математической статистики* широко применяют при исследовании гидрологических явлений, особенно при расчетах характеристик речного стока.

Применение статистических методов вытекает из физической сущности гидрологических явлений и процессов, представляющих собой результат действия большого числа факторов. При этом учесть в полной мере степень участия каждого фактора в формировании рассматриваемого явления не представляется возможным. Математическое описание совокупности явлений, сформированных вследствие многофакторных связей, может быть выполнено лишь статистическими методами.

Возможность использования статистических закономерностей при расчетах характеристик гидрологического режима (максимальных, средних годовых и минимальных расходов воды, распределения стока внутри года, величины стока наносов, осадков и др.) опирается на положение о случайном характере формирования гидрологических рядов. Случайными считают какие-либо значения одной и той же величины, последовательность появления которых не связана с появлением предыдущих значений этой величины. Принятие гипотезы о подчинении колебаний гидрологических величин закономерностям колебаний, свойственным случайным величинам, означает случайность появления данного явления только во времени, но не

в его размерах. Величина конкретной гидрологической характеристики, сформировавшейся на конкретном бассейне, обусловлена сочетаниями ряда факторов, действовавших в промежутке времени ее формирования.

#### 2.2.4. Обеспеченность гидрологических характеристик

Колебания стоковых характеристик не являются функцией времени и не имеют определенных закономерностей, поэтому по имеющимся данным наблюдений за элементами гидрологического режима невозможно установить хронологический ход стока на будущий период. На современном этапе знаний предстоящий сток приходится описывать в виде вероятностно-количественной оценки, отвечающей той или иной *повторяемости* или *обеспеченности* исследуемой характеристики  $X_i$  [4].

Календарный ряд наблюдений за  $n$  лет располагают не в календарной последовательности, а в порядке убывания. Разность между наибольшим  $X_{\max}$  и наименьшим  $X_{\min}$  значениями в ряду убывания – *амплитуда* или *варьирование* величин в ряду. Обычно амплитуду колебаний делят на отдельные **интервалы** или градации, число которых обычно назначают в зависимости от объема рассматриваемого материала так, чтобы отразить типичные черты рассматриваемого ряда наблюдений. Для приближенной оценки **числа интервалов** используют эмпирические формулы, например  $n_x \leq 5 \lg n$ , где  $n_x$  – число интервалов,  $n$  – общее число наблюдений.

После назначения интервалов подсчитывается число попаданий случайной величины в каждый интервал, при этом сумма случаев по всем грациям равна общему числу лет наблюдений  $n$ .

Число величин в каждом интервале называют **абсолютной частотой**. Выражая абсолютные частоты в процентах от общего числа случаев, получают **относительные частоты**. Сумма относительных частот равна 100 %. Абсолютные и относительные частоты представляют собой **повторяемость** величин попадающих в данный интервал.

Ступенчатый график – гистограмма распределения. При  $\Delta x \rightarrow 0$ , т.е. с увеличением интервалов, ступенчатая гистограмма превращается в плавную *кривую распределения вероятностей*, которую называют **кривой повторяемости**.

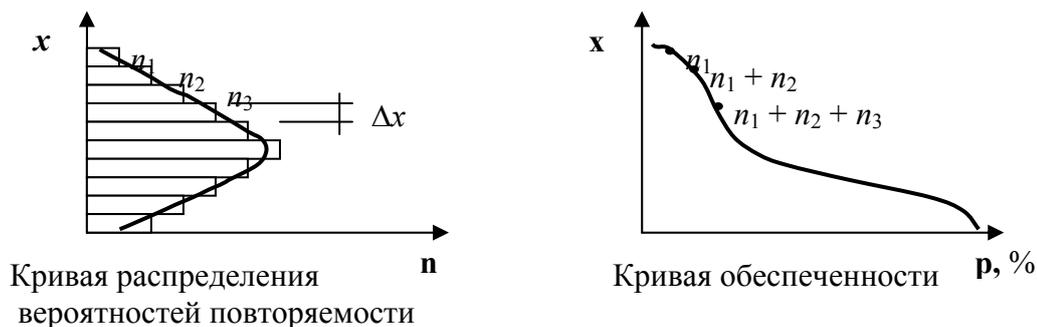


Рис. 2.5. Статистические кривые

Последовательным суммированием относительных частот в пределах от наибольшего значения получают *суммарную (интегральную) кривую распределения вероятностей*, которую называют **кривой обеспеченности**.

Кривая обеспеченности – интегральная кривая, показывающая обеспеченность или вероятность превышения (в % или долях единицы) данной величины среди общей совокупности ряда:

$$P_{\%} = \frac{m}{n+1} \cdot 100, \quad (2.7)$$

где  $n$  – общее число лет наблюдений (количество членов ряда);

$m$  – место гидрологической характеристики в вариационном ряду наблюдений.

### 2.2.5. Теоретические кривые распределения

Эмпирические (опытные) кривые распределения вероятностей, построенные по фактическим наблюдениям ограниченного числа лет, не дают возможности решать задачу за пределами этих наблюдений. Особенно слабо освещаются данными наблюдений верхний и нижний участки кривой, представляющие собой наибольшие и наименьшие значения гидрологической характеристики. Однако именно эти участки являются наиболее важными в расчётах характеристик стока, поэтому в гидрологических расчётах при решении практических задачах в целях продления и сглаживания эмпирических кривые распределения применяют типовые математические кривые, наиболее полно отражающие характер изменчивости гидрологических характеристик.

Для аналитического описания кривой распределения гидрологических характеристик используют законы распределения случайных величин.

Для аналитического описания кривой распределения (повторяемости) гидрологических характеристик используют законы распределения случайных величин – симметричные и несимметричные кривые нормального распределения.

Формы кривой повторяемости в зависимости от особенностей формирования статистических совокупностей могут быть симметричными и асимметричными.

**Параметрами симметричной кривой повторяемости** являются среднее арифметическое значение переменной и среднее квадратичное отклонение (или коэффициент вариации). Среднее арифметическое переменной величины представляет собой аналог понятия «норма стока», значение которой

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{i=n} (x_i/n), \quad (2.8)$$

где  $x_i$  – значения рассматриваемой величины ( $i=1, \dots, n$ );

$n$  – число членов ряда.

Если члены ряда представлены в безразмерном виде, т.е. в модульных коэффициентах, то среднее арифметическое значение этого ряда равно единице.

Среднее квадратическое отклонение, или стандарт, при  $n > 30$  рассчитывается по формуле

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (2.9)$$

а при  $n < 30$  по формуле

$$\sigma_g = \sigma \sqrt{n / (n - 1)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}. \quad (2.10)$$

Для сравнения степени изменчивости отдельных статистических рядов, например годовых стоков разных рек, удобно выразить среднее квадратическое отклонение в долях от среднего арифметического значения. Это отношение получило название *коэффициента вариации (изменчивости)*:  $c_V = \sigma_x / \bar{x}$ .

В гидрологических расчетах коэффициент вариации наиболее часто (при  $n < 30$ ) вычисляют по формуле

$$c_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1) \bar{x}^2}{n - 1}}. \quad (2.11)$$

Заменяя  $x_i / \bar{x}$  на модульный коэффициент  $K_i$ , получают значение коэффициента вариации в безразмерном виде:

$$c_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (K_i - 1)^2 / (n - 1)}{n - 1}}. \quad (2.12)$$

**Несимметричные кривые распределения ряда**, свойственные рядам гидрологических характеристик, характеризуются тремя параметрами: средним арифметическим ряда, коэффициентом вариации и средним значением отклонений членов ряда от его среднего арифметического значения в кубе:

$$M_3 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^3}{(n - 1)}. \quad (2.13)$$

В симметричных рядах разные по величине положительные и отрицательные отклонения повторяются одинаково часто. Третьи степени этих отклонений получаются с разными знаками и, взаимно уравновешиваясь, дают в сумме ноль.

Когда положительные отклонения (многоводные годы) повторяются реже, чем отрицательные (маловодные годы), а наиболее часто встречающееся значение переменной величины меньше среднего арифметического значения, говорят о положительной асимметрии. При обратном соотношении наблюдается отрицательная асимметрия. При положительной асимметрии положительные отклонения немногочисленны, но больше по величине в сравнении с более многочисленными, но менее значительными по величине отрицательными отклонениями, поэтому сумма кубов отклонений будет положительной. Для получения безразмерного выражения характеристики изменчивости ряда среднее значение кубов отклонений делят на куб среднего квадратического отклонения и получают **коэффициент асимметрии**

$$c_s = n \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^3 / [\sigma^3(n-1)(n-2)]. \quad (2.14)$$

Для безразмерного ряда получим

$$c_s = n \sum_{i=1}^{i=n} (K_i - 1)^3 / [c_v^3(n-1)(n-2)]. \quad (2.15)$$

*Характеризующие кривую распределения вероятности выражения для среднего арифметического значения, среднего квадратического отклонения и куба его среднего отклонения называют **моментами**.*

Моментами отдельных ординат кривой распределения называют произведения этих ординат на расстояние до той ординаты, относительно которой ведется исчисление. Моменты, определяемые относительно начала кривой распределения, называют начальными или нулевыми:

$$M_{01} = y_i x_i. \quad (2.16)$$

Моменты, определяемые относительно точки, соответствующей среднему арифметическому значению ряда или центра распределения, называют центральными:

$$M_{c1} = y_i (x_i - \bar{x}). \quad (2.17)$$

Принимая площадь кривой распределения или  $\sum y_i$  за единицу, моменты случайной величины  $x_i$  можно записать в общем виде:

– начальный момент  $k$ -й степени или  $k$ -го порядка

$$M_{0k} = \sum x_i^k / n, \quad (2.18)$$

что представляет собой среднее значение  $x$  в  $k$ -й степени;

– центральный момент  $k$ -го порядка

$$M_{c,k} = 1/n \sum (x_i - \bar{x})^k, \quad (2.19)$$

что представляет собой среднее значение отклонений отдельных  $x_i$  от их средней величины  $\bar{x}$  в степени  $k$ .

Основные параметры кривой распределения вероятностей ( $\bar{x}$ ,  $c_v$  и  $c_s$ ) связаны с начальным моментом  $M_0$  и центральным моментом  $M_c$  следующими равенствами:

1. Среднее арифметическое значение равно первому начальному моменту:

$$\bar{x} = M_{01}. \quad (2.20)$$

2. Среднее квадратическое отклонение равно квадратному корню из второго центрального момента:

$$\sigma = \sqrt{M_{c2}}. \quad (2.21)$$

3. Коэффициент вариации равен квадратному корню из второго центрального момента, деленному на значение первого начального момента:

$$c_v = \sigma / \bar{x} = \sqrt{M_{c2} / M_{01}}.$$

4. Коэффициент асимметрии равен третьему центральному моменту, деленному на второй центральный момент в степени  $3/2$ :

$$c_s = M_{03} / \sigma^3 = M_{c3} / M_{c2}^{3/2} = M_{c3} / c_v^3. \quad (2.22)$$

Таким образом,  $M_{01} = \bar{x}$  характеризует среднюю величину,

$M_{02} = \sigma^2$  – среднее квадратическое отклонение;

$M_{c3} = c_s c_v^3$  – степень асимметричности.

**Метод моментов** лежит в основе выравнивания эмпирических кривых распределения, которое заключается в том, что эмпирическая кривая заменяется такой теоретической кривой, моменты площади которой равны моментам площади эмпирической кривой.

В практике гидрологических расчетов из множества математических кривых распределения наибольшее распространение получили *биномиальная кривая распределения* (кривая Пирсона III типа) и *кривые трехпараметрического гамма-распределения*, разработанные С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем.

Биномиальную кривую распределения и ее интегральное выражение с приемлемой практической точностью определяют тремя параметрами:  $\bar{x}$ ,  $c_v$  и  $c_s$ . Их значения вычисляют непосредственно по материалам наблюдений, чаще всего методом моментов.

С целью практического применения кривой Пирсона III типа Фостер произвел приближенное интегрирование уравнения биномиальной кривой распределения для различных значений коэффициента асимметрии и представил результаты в виде таблицы. В 1938 г. таблица Фостера была уточнена С.И. Рыбкиным, затем расширена до более высоких значений коэффициентов асимметрии (до  $c_s=5,2$ ) сотрудниками ГГИ. В справочной литературе приводят отклонения  $\Phi(c_s, P\%)$  от среднего значения ординат кривой обеспеченности  $K_p\%$ , выраженные в долях коэффициента  $c_v$ , т.е.

$$\Phi(c_s, P\%) = \frac{K_{P\%} - 1}{c_v}. \quad (2.23)$$

Отсюда ордината кривой обеспеченности равна

$$K_{P\%} = 1 + c_v \cdot \Phi(P\%, c_s). \quad (2.24)$$

По выражению (2.24) находят ординаты  $K_{P\%}$  для различных обеспеченностей  $P\%$ , по которым можно построить теоретическую кривую обеспеченности.

Таким образом, найденные по материалам наблюдений коэффициент вариации  $c_v$  и коэффициент асимметрии  $c_s$  позволяют получить сглаженную кривую, и экстраполировать данные наблюдений до заданных значений обеспеченностей.

Очертания теоретических биномиальных кривых распределения в интегральной форме (кривых обеспеченности) обусловлены параметрами  $c_v$  и  $c_s$ . На рис. 2.6,а приведены биномиальные кривые обеспеченности при одном и том же значении параметра коэффициента асимметрии  $c_s=2 c_v$ , но при различных значениях коэффициента вариации; на рис. 2.6,б приведены биномиальные кривые обеспеченности при одном и том же коэффициенте вариации  $c_v = 0,5$ , но при различных значениях коэффициента асимметрии.

Использование биномиальной кривой распределения Пирсона III типа, широко применявшейся в практике гидрологических расчетов, долгое время являлось почти единственным достаточно простым расчетным способом определения колебаний гидрологических характеристик. В то же время эта кривая имеет существенные недостатки: отсутствие верхнего предела и наличие ограниченного нижнего предела  $c_v$ . Если первый недостаток можно отнести к формальным, то второй недостаток является существенным. Биномиальная кривая распределения Пирсона III типа неприменима к расчету стока в случае  $c_s < 2 c_v$ .

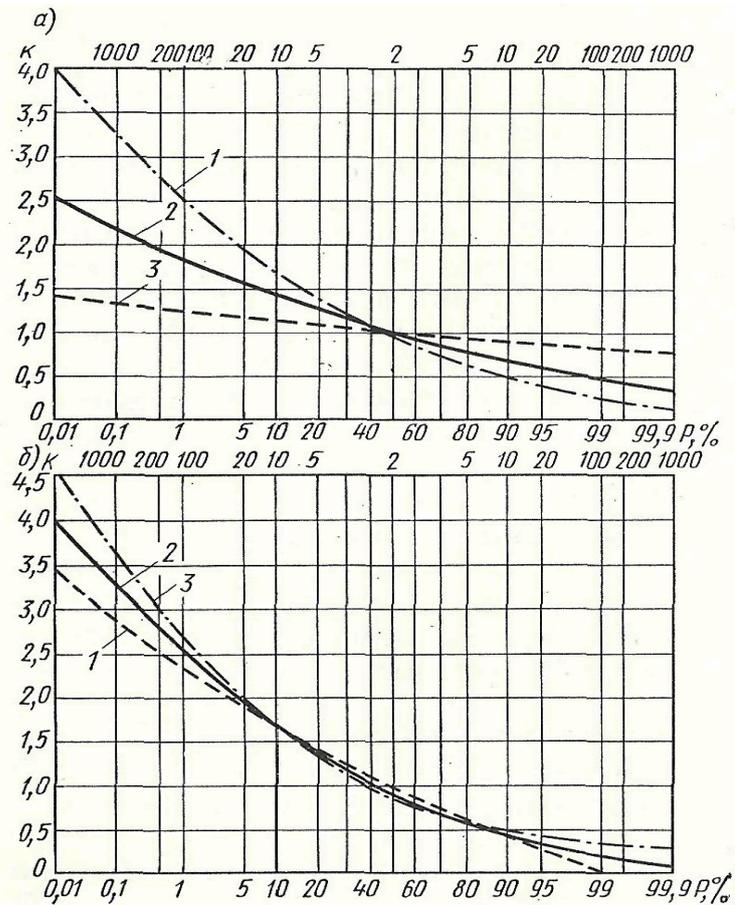


Рис. 2.6. Влияние параметров ( $c_v$ ,  $c_s$ ) на форму биномиальной кривой распределения:

- а)  $c_s = 2c_v$ :  
 1 –  $c_v = 0,5$ ; 2 –  $c_v = 0,3$ ; 3 –  $c_v = 0,1$ ;  
 б)  $c_v = 0,5$ :  
 1 –  $c_s = 0,5$ ; 2 –  $c_s = 1,0$ ; 3 –  $c_s = 1,5$

Путем трансформации исходного уравнения биномиальной кривой Пирсона III типа С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем при  $c_s = 2c_v$  и  $\bar{x} = 1$  было получено семейство кривых распределения при допущении, что некоторая функция  $x$  исследуемой величины подчиняется закону гамма-распределения. Уравнение этих кривых имеет вид

$$y = \left( \frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)} \right)^{\gamma/b} \frac{1}{\bar{x}|b|\Gamma(\gamma)} \left( \frac{x}{\bar{x}} \right)^{\gamma/b-1} \exp \left\{ - \left[ \frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)} \cdot \frac{x}{\bar{x}} \right]^{1/6} \right\}, \quad (2.25)$$

где  $\gamma$  и  $b$  – параметры, связанные трансцендентными уравнениями с параметрами  $c_v$  и  $c_s$ ;

$\Gamma(\gamma)$  – гамма-функция;

$x$  – исследуемая случайная величина;

$\bar{x}$  – среднее значение  $x$ .

Кривые распределения, выраженные этими уравнениями, также могут быть определены тремя параметрами:  $x$ ,  $c_v$  и  $c_s$ . Соответствующее им рас-

пределение носит название трехпараметрического гамма-распределения. Кривые трехпараметрического гамма-распределения могут быть применены при любом соотношении  $c_s$  и  $c_v$ . В случае  $c_s = 2c_v$  они совпадают с биномиальной кривой распределения. Все кривые трехпараметрического гамма-распределения выходят из начала координат. Параметры кривых обеспеченности С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля определяются теми же методами, что и параметры биномиальной кривой распределения.

Результаты интегрирования кривых трехпараметрического гамма-распределения, представленные в табличной форме, позволяют определить ординаты теоретической кривой обеспеченности  $K_p \%$  в зависимости от  $c_v$  и соотношения  $c_v/c_s$ . Трехпараметрическое гамма-распределение отличается значительной гибкостью, имеет более широкий диапазон применения при расчетах стока, чем биномиальная асимметричная кривая распределения.

Для определения параметров теоретических кривых распределения (обеспеченности) гидрологических характеристик кроме метода моментов применяют *метод наибольшего правдоподобия и графоаналитический метод*.

Английский математик Фишер показал, что наилучшая точность оценки выборочных параметров при заданных эмпирических наблюдениях достигается методом наибольшего правдоподобия. Сущность метода заключается в том, что в качестве оценки искомого параметра применяется такое его значение, при котором произведение вероятностей наблюдаемых величин (так называемая функция правдоподобия) имеет наибольшее значение.

Крицкий С.Н. и Менкель М.Ф., применив метод наибольшего правдоподобия к уравнению биномиальной кривой распределения, установили, что наилучшими оценками являются среднее арифметическое значение ряда  $\bar{x}$  и среднее значение логарифмов переменной величины  $x_i$ , выраженное в долях от  $\bar{x}$ .

При практическом использовании метода наибольшего правдоподобия среднее арифметическое значение переменной определяется по формуле (2.7), коэффициент вариации  $c_v$  и коэффициент асимметрии  $c_s$  находят по номограммам как функции статистик  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ , которые рассчитывают по выражениям

$$\lambda_2 = \sum_{i=1}^{i=n} \lg K_i / (n-1); \quad \lambda_3 = \sum_{i=1}^{i=n} K_i \lg K_i / (n-1). \quad (2.26)$$

Несомненным достоинством метода наибольшего правдоподобия является удобство при выполнении практических расчетов. Следует помнить, что метод наибольшего правдоподобия применяют только для трехпараметрического гамма-распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. Использование других типов распределения, например биномиальной кривой Пирсона III типа, при этом методе неправомерно.

**Графоаналитический метод** определения параметров кривой обеспеченности был разработан Г.А. Алексеевым в 1960 г. применительно к биномиальному закону распределения или биномиальным кривым обеспеченности при любом значении  $c_V$ . Метод заключается в определении параметров кривых распределения непосредственно по эмпирической кривой обеспеченности. При этом для решения задачи достаточно иметь совпадение теоретической и эмпирической кривых обеспеченности в трех точках. По ординатам эмпирической кривой обеспеченности в точках  $x_{50\%}$  и равноудаленных от нее точках  $x_{5\%}$  и  $x_{95\%}$  рассчитывают коэффициент скошенности кривой  $S$ . Затем по таблице, составленной Г.А. Алексеевым, определяют значение коэффициента асимметрии  $c_s$ , после чего по таблице ординат биномиальной асимметричной кривой Фостера – Рыбкина находят относительные, или нормированные, отклонения ординат биномиальной кривой обеспеченности  $\Phi_{5\%}$ ,  $\Phi_{50\%}$  и  $\Phi_{95\%}$ .

Ординаты теоретической биномиальной кривой обеспеченности определяют по выражению (2.24). Заменяя

$$K_{p\%} = x_{p\%} / \bar{x} \text{ и } c_V = \sigma_x / \bar{x},$$

выражение (2.24) можно записать в виде

$$x_{p\%} = \bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{p\%}, c_s). \quad (2.27)$$

Исходя из условия совпадения теоретической кривой, выраженной уравнением (2.24), и эмпирической кривой в трех точках  $x_{5\%}$ ,  $x_{50\%}$  и  $x_{95\%}$  можно записать три уравнения:

$$x_{5\%} = \bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{5\%}, c_s); \quad (2.28)$$

$$x_{50\%} = \bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{50\%}, c_s); \quad (2.29)$$

$$x_{95\%} = \bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{95\%}, c_s), \quad (2.30)$$

где известны  $x_{5\%}$ ,  $x_{50\%}$  и  $x_{95\%}$  и соответственно  $\Phi_{5\%}$ ,  $\Phi_{50\%}$  и  $\Phi_{95\%}$ .

Для определения  $\sigma_x$  вычитают из уравнения (2.28) уравнение (2.30):

$$\bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{5\%}, c_s) - \bar{x} + \sigma_x \Phi(P_{95\%}, c_s) = x_{5\%} - x_{95\%}$$

или

$$\sigma_x [\Phi(P_{5\%}, c_s) - \Phi(P_{95\%}, c_s)] = x_{5\%} - x_{95\%},$$

откуда

$$\sigma_x = (x_{5\%} - x_{95\%}) / (\Phi_{5\%} - \Phi_{95\%}). \quad (2.31)$$

$$\bar{x} = x_{50\%} - \sigma_x \Phi(P_{50\%}, c_s)$$

или

$$\bar{x} = x_{50\%} - \sigma_x \Phi_{50\%}. \quad (2.32)$$

На основании полученных значений  $\sigma_x$  и  $\bar{x}$  вычисляют коэффициент вариации  $c_v = \sigma_x / \bar{x}$ .

Графоаналитический метод определения параметров теоретической кривой обеспеченности менее трудоемкий, чем метод моментов и метод наибольшего правдоподобия. Преимуществом его является также отсутствие необходимости подбора такого неустойчивого параметра, как коэффициент асимметрии  $c_s$ . Однако точность параметров, установленных этим методом, зависит от обоснованности проведения сглаженной эмпирической кривой обеспеченности, с которой снимаются значения в трех опорных точках, что не лишено элемента субъективизма.

Кроме рассмотренных кривых распределения, широко применяющихся при расчетах гидрологических характеристик, в отечественной и зарубежной практике используют и другие кривые распределения (В.Д. Гудрича, Гумбеля, Г.Н. Бровковича и т.д.).

## 2.3. Гидрологические расчёты

### 2.3.1. Общие рекомендации

Расчетные гидрологические характеристики при проектировании гидротехнических сооружений, сооружений мелиоративных систем, систем водоснабжения, при планировке и застройке населенных пунктов, разработке генеральных планов промышленных и сельскохозяйственных предприятий, мероприятий по борьбе с наводнениями и т.д. определяются в соответствии со специальным нормативным документом [15].

К расчетным гидрологическим характеристикам относятся характеристики годового стока (и его внутригодовое распределение), максимального снегового и дождевого стока, минимальных расходов воды и отметок уровней воды рек и озер. Эти характеристики устанавливаются непосредственно по опубликованным материалам гидрометрических наблюдений. При этом в качестве критерия при определении значения расчетной гидрологической характеристики принимается *ежегодная обеспеченность* этой величины, устанавливаемая нормативными документами.

Для непосредственных расчетов или общей оценки гидрологических характеристик исключительно большое значение имеет продолжительность гидрометрических наблюдений за режимом рек. Результаты этих наблюдений являются основой для определения будущего режима рек после постройки водохранилищ, плотин, мостов и других сооружений. Сначала характеристики стока определяются для естественного состояния рек, за-

тем в них вносятся поправки, учитывающие изменения стока под влиянием того или иного вида хозяйственной деятельности в речном бассейне.

В зависимости от полноты информации о режиме рек встречаются три случая:

- наличие наблюдений за стоком за достаточно продолжительный период;
- недостаточность гидрометрических данных при коротком периоде наблюдений;
- полное отсутствие данных гидрометрических наблюдений.

**При наличии данных гидрометрических наблюдений** основой для расчета гидрологических характеристик являются теоретические кривые распределения ежегодных вероятностей превышения (обеспеченности). Согласно нормам [15] продолжительность ряда наблюдений считается достаточной для установления расчетных значений гидрологических характеристик заданных обеспеченностей, если рассматриваемый период является *репрезентативным* (представительным) и *величина относительной средней квадратической ошибки расчетного значения исследуемой гидрологической характеристики не превышает 10 %*.

Оценку репрезентативности ряда гидрометрических наблюдений за гидрологической характеристикой производят, если продолжительность наблюдений не превышает 50...60 лет. Это можно выполнить по разностным интегральным кривым гидрологической характеристики или сопоставлением кривых распределения той же характеристики по реке-аналогу с не менее чем 50-летним периодом наблюдений.

Оценка репрезентативности короткого ряда наблюдений исследуемой реки может быть также произведена *путем приведения наблюдений этого ряда к более длительному периоду по наблюдениям на реках-аналогах*. При этом используют данные многолетних наблюдений за стоком в разных пунктах рассматриваемого района и в качестве опорных принимают пункты с наиболее длительными, по возможности непрерывными и надежными наблюдениями, расположенные на реках, являющихся типичными для данного района по характеру колебаний стока. Данные по опорным пунктам с длительными рядами наблюдений приведены в материалах Водного кадастра (III серия «Водные ресурсы») и могут быть использованы для выбора расчетного репрезентативного периода наблюдений за стоком на изучаемой реке.

После установления расчетного периода и оценки его репрезентативности производят статистическую обработку ряда данных наблюдений за рассматриваемой гидрологической характеристикой.

Эмпирическую обеспеченность  $P\%$  гидрологических характеристик определяют по формуле (2.7). Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых обеспеченности, как правило, применяют трехпараметриче-

ское гамма-распределение при любом соотношении коэффициентов вариации  $c_v$  и асимметрии  $c_s$  или биномиальную кривую распределения при  $c_s \geq 2c_v$ .

**Параметры теоретических кривых распределения** – среднее многолетнее значение характеристики, коэффициенты вариации  $c_v$  и асимметрии  $c_s$  – устанавливаются по ряду гидрометрических наблюдений за рассматриваемой гидрологической характеристикой методом моментов соответственно по формулам (2.8), (2.12) и (2.15).

При значениях коэффициента вариации  $c_v > 0,5$  для трехпараметрического гамма-распределения используют метод наибольшего правдоподобия, определяя расчетные значения коэффициентов вариации и асимметрии по номограммам как функции статистик, рассчитанных по формуле (2.26). Для биномиального распределения при  $c_v > 0,5$  возможно использование графоаналитического метода.

Ординаты теоретической кривой обеспеченности при использовании биномиальной кривой распределения находят по выражению (2.29).

При определении расчетных гидрологических характеристик кроме материалов систематических гидрометрических наблюдений должны использоваться обоснованные данные о выдающихся значениях гидрологических характеристик, например максимальных расходах исследуемой реки. Сведения о них могут быть получены путем изучения меток высоких вод, опроса населения или из архивных источников.

*При недостаточности гидрометрических данных* в практике расчетов гидрологических характеристик различной обеспеченности приходится иметь дело с короткими рядами наблюдений, продолжительность которых не обеспечивает получения результата с требуемой точностью (ошибка 10 %). В этом случае производят **приведение параметров кривых обеспеченности гидрологических характеристик ( $Q$ ,  $H$ ,  $K$ ) к расчетному многолетнему периоду по рекам-аналогам**, которые имеют длинный ряд наблюдений, обеспечивающий необходимую точность, и колебания расчетных характеристик, соответствующие колебаниям их в расчетном створе изучаемой реки.

При выборе рек-аналогов необходимо выполнение следующих условий:

- наибольшая географическая близость расположения водосборов;
- площади водосборов не должны различаться более чем в 10 раз, а их средние высотные положения (для горных рек) – более чем на 300 м;
- сходство климатических условий;
- однородность условий формирования стока;
- однородность почв (грунтов) и гидрогеологических условий;
- по возможности близкие степени озерности, залесенности, заболоченности и распаханности;

- отсутствие факторов, существенно изменяющих естественный речной сток (регулирование стока, сбросы, изъятия на орошение, водоснабжение и другие нужды).

Приведение параметров кривых обеспеченности рассматриваемой гидрологической характеристики стока к многолетнему периоду осуществляется аналитическим, графическим и графоаналитическим способами.

*Аналитический способ* приведения гидрологических характеристик, например среднего годового стока, к многолетнему периоду наблюдений заключается в установлении корреляционной связи между средним годовым стоком в неизученном бассейне и изученном бассейне-аналоге.

Среднее многолетнее значение  $\bar{Q}$  определяют по выражению

$$\bar{Q} = \bar{Q}_{n'} + R(\sigma_n/\sigma_{n'a})(\bar{Q}_a - \bar{Q}_{n'a}), \quad (2.33)$$

где  $\bar{Q}$ ,  $\bar{Q}_a$  – средние многолетние величины годового стока за  $N'$  лет наблюдений, соответственно для исследуемой реки и реки-аналога;

$\bar{Q}_{n'}$ ,  $\bar{Q}_{n'a}$  – средние арифметические величины стока за период совместных наблюдений за  $n$  лет, соответственно для исследуемой реки и реки-аналога;

$\sigma_n$ ,  $\sigma_{n'a}$  – средние квадратические отклонения годового стока за совместный период  $n'$  лет, соответственно для исследуемой реки и реки-аналога;

$R$  – коэффициент корреляции между величинами среднего годового стока исследуемой реки и реки-аналога.

Коэффициент вариации при  $R \geq 0,8$

$$c_{vN'} = (\sigma_{N'} / \bar{Q}) \sqrt{1 - R^2(1 - \sigma_{n'a}^2 / \sigma_{N'a}^2)}, \quad (2.34)$$

где  $\sigma_{N'a}$  – среднее квадратическое отклонение годового стока за  $N'$ -летний период для реки-аналога.

Аналогичные формулы используют и для определения других гидрологических характеристик.

*Графический способ* приведения короткого ряда к многолетнему периоду наблюдений применяют при наличии прямолинейной зависимости  $\bar{Q} = k_a \bar{Q}_a$ . Коэффициент вариации для исследуемой реки при этом находят по формуле

$$c_v = k_a Q_a c_{v,a} / \bar{Q}, \quad (2.35)$$

где  $k_a$  – угловой коэффициент прямой связи;

$Q_a$ ,  $c_{v,a}$  – норма стока и коэффициент вариации для реки-аналога, определяемые по многолетнему ряду наблюдений;

$\bar{Q}$  – норма стока в неизученном бассейне, определяемая по графику связи.

Изложенные способы приведения параметров кривых распределения к многолетнему периоду применимы на обработке данных исследуемой реки и реки-аналога при наличии короткого периода совместных наблюдений.

**При отсутствии данных гидрометрических наблюдений** характеристики стока определяют по картам изолиний рассматриваемой характеристики, если таковые имеются, или по эмпирическим формулам, которые в явной или неявной форме учитывают зависимость искомым характеристик от основных физико-географических факторов стока.

### 2.3.2. Особенности расчёта годового стока и его внутригодового распределения

Основой для определения расчетных значений годового стока воды являются среднегодовые расходы воды в исследуемом створе. При отсутствии данных наблюдений норму стока определяют по картам изолиний среднего многолетнего годового стока рек  $[(\text{л/с})/\text{км}^2]$  или прямолинейной интерполяцией нормы стока между опорными пунктами с известными значениями среднего многолетнего стока. Определение нормы стока по карте изолиний основано на допущении плавного изменения среднемноголетнего стока по территории в зависимости от зонального изменения физико-географических факторов стока. Карты изолиний нормы стока составлены для рек с площадями водосборов до 50 тыс.  $\text{км}^2$ , но при отсутствии резких изменений в рельефе и климатических условиях их можно использовать и для рек с большими площадями водосборов.

Коэффициент вариации  $c_v$  определяют по карте изолиний так же, как по карте нормы стока. Карта коэффициентов вариации  $c_v$  рекомендована для равнинных рек с площадью водосбора от 1000 до 50000  $\text{км}^2$  при отсутствии озер или при озерности, не превышающей 3 % от площади водосбора.

При коротких рядах наблюдений или при полном их отсутствии коэффициент асимметрии  $c_s$  находят по отношению этого параметра к коэффициенту вариации  $c_v$  по реке-аналогу.

При отсутствии надежных аналогов расчетное значение отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации  $c_s/c_v$  определяют по [11].

В практике гидрологических расчетов очень часто возникает необходимость определения не только годового стока, но и распределения последнего внутригодового интервала времени.

**Внутригодовое распределение стока** в зависимости от задач водохозяйственного проектирования может быть представлено в виде хронологического изменения расходов по месяцам или сезонам или в порядке убывания расходов воды. В первом случае внутригодовое распределение стока воды при наличии данных гидрометрических наблюдений за период

не менее 15...20 лет проводится или методом компоновки сезонов, или методом характерного реального года.

*Метод компоновки сезонов* – основной способ расчета календарного внутригодового распределения стока. По методу компоновки рассматриваются межсезонное и внутрисезонное распределения стока.

Для исследований и расчета межсезонного распределения стока каждый год делится на два основных периода: паводочный (многоводный) и меженный (маловодный). Для практических задач проектирования маловодный период, в свою очередь, делится на два сезона. Всего в году должно быть не более трех сезонов. Период года и сезон, когда естественный сток может ограничивать потребление, принимают за лимитирующие, так как в этот период года и сезон создаются неблагоприятные условия работы водохозяйственных предприятий. Так, для рек с весенним половодьем за лимитирующий период принимаются два маловодных сезона: летне-осенний и зимний. При преобладающем водопотреблении на сельскохозяйственные нужды (орошение, обводнение) за лимитирующий сезон принимается летне-осенний, для энергетики и водоснабжения – зимний.

Расчеты внутригодового распределения стока при выделении сезонов ведут обычно не по календарным годам, а по водохозяйственным, принимая за начало водохозяйственного года многоводный период (для Среднего Поволжья – март). Границы сезонов назначаются одинаковыми для всех лет с округлением их до целого месяца. Длительность многоводного периода устанавливается так, чтобы в его границы помещались половодья всех лет, как с наиболее ранним сроком его наступления, так и с наиболее поздним сроком окончания.

Назначив границы периодов и сезонов, определяют сток за отдельные периоды и сезоны каждого года путем суммирования средних месячных расходов.

По значениям годового стока и стока за отдельные периоды и сезоны каждого года наблюдений строят эмпирические кривые обеспеченности. Статистические параметры  $\bar{x}$  и  $c_v$  вычисляют непосредственно по полученным рядам. Третий параметр теоретической кривой обеспеченности – коэффициент асимметрии  $c_s$  – лучше подбирать по данным рек-аналогов, расположенных в гидрологически однородном районе.

Далее при установленных параметрах теоретической кривой обеспеченности вычисляют значения стока одной и той же заданной обеспеченности за год, лимитирующий период и (внутри него) лимитирующий сезон. Сток нелимитирующего периода определяют по разности между стоком за год и лимитирующий период, а сток за нелимитирующий сезон, входящий в лимитирующий период, вычисляют по разности между стоком этого периода и лимитирующего сезона.

Внутрисезонное распределение стока зависит от водности сезона. Распределение стока по месяцам устанавливают приближенно. Принимают

три градации водности рассматриваемого сезона: многоводную, включающую годы с обеспеченностью стока за сезон менее 33 %, среднюю по водности с обеспеченностью от 33 до 66 % и маловодную с обеспеченностью более 66 %.

Для межлетних периодов распределение стока внутри сезонов рассчитывают по месячным интервалам времени; в период половодья интервалы времени уменьшают до декады ввиду значительной внутримесячной неравномерности стока.

Изложенный метод В.Г. Андреенова применяют при наличии данных наблюдений не менее чем за 10 лет при условии включения в него маловодных, многоводных и средних по водности лет.

Более простым методом расчета внутригодового распределения стока рек, представленного по годам в календарной последовательности, является *метод характерного реального года*. За расчетную модель принимают фактический гидрограф, у которого обеспеченность годового стока, лимитирующего периода и сезона близка к заданной обеспеченности. Реальный гидрограф, соответствующий поставленному условию, выбирают путем анализа эмпирических кривых обеспеченности значений годового стока и стока лимитирующего периода. Для этого гидрографа определяется процентное помесечное распределение стока. В соответствии с процентным распределением стока в реальном году распределяется по месяцам расчетный годовой сток, найденный по кривой обеспеченности. Полученное таким образом реальное распределение стока служит расчетной моделью.

**При отсутствии или недостаточности данных наблюдений** расчет внутригодового распределения стока ведут по методу гидрологической аналогии.

### 2.3.3. Особенности расчёта максимального стока

Максимальным стоком называют сток весенних половодий или дождевых паводков. В гидрологической практике это понятие отождествляют с объемом или слоем стока за основную волну половодья или за наибольший дождевой паводок. Максимальным расчетным расходом называют расход, на пропуск которого рассчитывают водопропускные и водосбросные отверстия гидротехнических сооружений, мостовые отверстия и т.д. Занижение максимального расчетного расхода приводит к переполнению водохранилищ и разрушению сооружений, что влечет за собой значительный материальный ущерб. В случае заселенности местности, расположенной ниже сооружения, выбор максимального расчетного расхода выходит за пределы экономических соображений и перерастает в социальную проблему, связанную с безопасностью людей. Завышение расчетного максимального расхода удорожает стоимость сооружения, что снижает его экономическую эффективность.

Расчетная ежегодная вероятность превышения (обеспеченность) максимальных расчетных расходов устанавливается нормативными документами [15], которые определяют ее в зависимости от рода сооружения, их класса и условий эксплуатации: постоянные сооружения делятся на четыре класса; I, II, III и IV; для них принимаются соответственно обеспеченности 0,01, 0,1, 0,5 и 1,0 %.

Максимальные расходы разделяют по их происхождению на *максимумы, формирующиеся от снеготаяния* (с учетом возможной составляющей от дождя), *максимумы, формирующиеся от дождей* (с учетом возможной составляющей от снеготаяния), *максимумы смешанные*, которые рассчитывают отдельно.

При наличии данных гидрометрических наблюдений по максимальному стоку за достаточно длительный период наблюдений расчетные максимальные расходы талых и дождевых вод определяют по теоретической кривой обеспеченности. Оценка продолжительности имеющегося ряда наблюдений, достаточного для проведения расчетов, может быть произведена по приближенной зависимости

$$N_{\min} \approx 1/(P_{\%} K c_v), \quad (2.36)$$

где  $N_{\min}$  – минимальная длина ряда, годы;

$P_{\%}$  – вероятность превышения (в долях единицы) вычисляемого расхода воды;

$K c_v = 2 \dots 3$  в зависимости от коэффициента вариации ( $K c_v = 2$  для малых коэффициентов вариации  $c_v < 0,5$  и  $K c_v = 3$  для больших коэффициентов вариации  $c_v > 0,5$ ).

Если продолжительность наблюдений за максимальными расходами меньше рассчитанной по формуле (2.36), то следует осуществлять приведение параметров распределения к многолетнему периоду.

При недостаточности исходного ряда производят приведение к многолетнему периоду наблюдений с использованием при определении средне-многолетнего максимального расхода и коэффициента вариации метода корреляции. Коэффициент асимметрии  $c_s$  устанавливают по данным рек-аналогов. При отсутствии надежных аналогов соотношение коэффициентов асимметрии  $c_s$  и вариации  $c_v$  и зависимости от происхождения максимальных расходов принимают:

- для расходов талых вод равнинных рек  $c_s = (2 \dots 2,5) c_v$ ;
- для дождевых расходов равнинных рек и горных рек с муссонным климатом  $c_s = (3 \dots 4) c_v$ ;
- для расходов воды горных рек  $c_s = 4 c_v$ .

При проектировании сооружений первого класса, разрушение которых угрожает катастрофическими наводнениями, водопропускные отверстия рассчитывают на пропуск расхода  $Q'_p$  %, полученного прибавлением к

максимальному расчетному расходу обеспеченностью  $P_{\%} = 0,01 \%$ , определенному по кривой обеспеченности гарантийной поправки:

$$Q'_{p\%} = Q_{p\%} + \Delta Q_{p\%}. \quad (2.37)$$

Гарантийную поправку назначают для учета возможности совпадения периода наблюдений за максимальным стоком реки с относительно низкими половодьями и паводками. Ее значение пропорционально средней квадратической ошибке вычисленного максимального расхода воды:

$$\Delta Q_{p\%} = \frac{a E_{p\%}}{\sqrt{n_b}} Q_{p\%}, \quad (2.38)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий гидрологическую изученность реки ( $a = 1,0$  для изученных рек,  $a = 1,5$  для слабоизученных);

$E_{p\%}$  – случайная средняя квадратическая ошибка расчетного расхода воды  $P_{\%} = 0,01 \%$  [11];

$n_b$  – число лет наблюдений с учетом приведения к многолетнему периоду.

Гарантийная поправка не должна превышать 20 % от расчетного максимального расхода  $Q_{p\%}$ .

При отсутствии гидрометрических данных максимальные расходы весеннего половодья на реках с площадью водосбора до 20000 км<sup>2</sup> в европейской части и площадями водосбора до 50000 км<sup>2</sup> в азиатской части РФ определяют по эмпирическим формулам.

Расчетный максимальный расход воды талых вод на равнинных и горных реках определяют по следующей формуле [29]:

$$Q_{p\%} = [K_0 h_{p\%} \mu' \delta \delta_1 \delta_2 / (A + A_1)^{n_1}] A, \quad (2.39)$$

где  $K_0$  – параметр дружности половодья, определяемый по данным рек-аналогов обратным путем по формуле (2.39);

$h_{p\%}$  – расчетный слой суммарного весеннего стока (с учетом грунтового питания), мм, обеспеченностью  $P_{\%}$ , определяемый в зависимости от коэффициента вариации  $c_v$  и отношения  $c_s/c_v$  для этой величины, а также среднегодового слоя стока  $h$ , устанавливаемого по рекам-аналогам или интерполяцией по карте среднегодового стока половодья;

$\mu'$  – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимальных расходов (табл. 2.2);

$\delta$  – коэффициент, учитывающий регулирующее влияние водохранилищ, прудов и проточных озер;

$\delta_1$  – коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды в залесенных бассейнах;

$\delta_2$  – коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды в заболоченных бассейнах;

$A_1$  – дополнительная площадь водосбора, учитывающая снижение редукиции (уменьшения), км<sup>2</sup>;

$n_1$  – показатель степени редукиции (табл. 2.3);

$A$  – площадь водосбора до замыкающего створа, км<sup>2</sup>.

Т а б л и ц а 2 . 2

Значение коэффициента  $\mu'$

Природная зона	Значение $\mu'$ при обеспеченности расхода								
	0,1	1	3	5	10	25	50	75	95
Тундра и лесная зона	1,02	1,0	0,97	0,96	0,93	0,90	0,86	0,82	0,82
Лесостепная	1,04	1,0	0,96	0,93	0,89	0,80	0,72	0,64	0,58
Степная	1,04	1,0	0,97	0,96	0,93	0,88	0,79	0,64	0,42
Зона степей и полупустынь	1,02	1,0	0,98	0,97	0,96	0,92	0,80	0,70	0,50

Т а б л и ц а 2 . 3

Значение показателя степени редукиции  $n_1$  и дополнительной площади водосбора, учитывающей снижение редукиции

Природная зона	Для равнинных рек	
	$n_1$	$A_1$
Зона тундры и лесная зона (европейская территория РФ, Западная и Восточная Сибирь)	0,17	1
Лесостепная зона (европейская территория РФ и Западная Сибирь)	0,25	2
Степная зона, зона засушливых степей и полупустынь (европейская территория РФ и Западная Сибирь)	0,35	10

Регулирующее влияние проточных озер учитывается коэффициентом

$$\delta = (1 + c_l A_l)^{-1}, \quad (2.40)$$

где  $c_l$  – коэффициент, изменяющийся от 0,2 при  $\bar{h} > 100$  мм до  $c_l = 0,4$  при  $h < 20$  мм;

$A_l$  – средневзвешенная озерность, %, определяемая по формуле

$$A_l = \sum_{i=1}^{i=n} (100 S_l A_{i,l} / A). \quad (2.41)$$

Здесь  $S_l$  – площадь зеркала озера, км<sup>2</sup>;

$A_{i,l}$  – площадь водосбора озера, км<sup>2</sup>.

При наличии в бассейне озер, расположенных вне главного русла и основных притоков, коэффициент  $\delta$  следует принимать  $\delta=1$  при  $A_l < 2$  %,

$\delta = 0,8$  при  $A_l > 2$  %. Коэффициент  $\delta$ , учитывающий снижение максимального расхода воды рек, зарегулированных водохранилищами, находят с учетом проектных материалов, освещающих режим пропуска воды верхними водохранилищами.

Коэффициент  $\delta_1$  определяют по формуле

$$\delta_1 = \alpha_1 / (A_v + 1)^{n_2}, \quad (2.42)$$

где  $\alpha_1 = 0,7 \dots 1,4$  – коэффициент, зависящий от природной зоны и расположения леса на водосборе (равномерного в верхней или нижней части водосбора);

$n_2 = 0,1 \dots 0,22$  – коэффициент, зависящий от почвогрунтов под лесом;  
 $A_v$  – залесенность водосбора, %.

Коэффициент  $\delta_2$  находят по выражению

$$\delta_2 = 1 - \beta \cdot \lg(0,1A_s + 1), \quad (2.43)$$

где  $\beta$  – коэффициент, зависящий от типа болот ( $\beta = 0,8$  для низинных болот,  $\beta = 0,3$  – для верховых);

$A_s$  – относительная площадь болот и заболоченных лесов и лугов в бассейне, %.

При заболоченности менее 3 % или при проточной относительной озерности более 20 %  $\delta_2 = 1$ . Для горных рек коэффициент  $\delta_1 = \delta_2 = 1$ .

При определении максимальных расходов воды  $Q_p$  % ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) от дождевых паводков для больших и средних рек рекомендуется использовать эмпирическую формулу, учитывающую лишь главные факторы формирования максимального стока и выведенную в результате статистической обработки данных по дождевому стоку изученных рек:

$$Q_{p\%} = q_{200} (200/A)^{n_3} \delta_1 \delta_2 \delta_3 \lambda_{p\%} A, \quad (2.44)$$

где  $q_{200}$  – модуль максимального мгновенного расхода воды обеспеченностью  $P = 1$  % при  $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 1$ , приведенный к площади водосбора, равной  $200 \text{ км}^2$ ;

$\lambda_{p\%}$  – переходный коэффициент от обеспеченности  $P=1$  % к другой обеспеченности;

$\delta_3$  – коэффициент, учитывающий изменение параметра  $q_{200}$  с изменением средней высоты водосбора в горных районах, определяемый по данным гидрологически изученных рек.

Для малых рек, слабо изученных в гидрологическом отношении, целесообразнее использовать формулы, отражающие определенные теоретические представления о процессах формирования стока на склонах водосборов и в руслах рек.

#### 2.3.4. Особенности расчёта минимального стока

Минимальный сток формируется в межень, когда вследствие полного или частичного прекращения поверхностного стока река переходит на грунтовое питание. Различают следующие характеристики минимальных расходов воды: суточные и среднемесячные, определяемые отдельно для зимнего и летне-осеннего периодов.

Определение минимальных расходов воды связано с необходимостью обеспечения бесперебойного водоснабжения, орошения, обводнения и т.д. Все виды водохозяйственной деятельности прежде всего сказываются на величине минимального стока. Сведения о минимальных расходах необходимы как при оценке естественного стока рек, так и при определении степени хозяйственного воздействия на речной сток (например, при сбросах очищенных сточных вод в водные объекты).

При проектировании водохозяйственных сооружений минимальный расчетный расход определяют в зависимости от принадлежности объекта к той или иной отрасли народного хозяйства главным образом в диапазоне обеспеченностей 75...97 %.

Для определения минимального расчетного расхода используют данные наблюдений за стоком в зимний и летне-осенний периоды. Основными расчетными характеристиками минимального стока являются *минимальный среднесуточный расход*, *минимальный средний месячный расход* за календарный месяц или за 30 суток с наименьшими расходами воды. Минимальный средний месячный расход используют в случае продолжительной и устойчивой межени (не менее 2 месяцев) при условии отсутствия в течение этого времени паводков. Если меженный период короткий или прерывистый (состоит из нескольких периодов, разделенных паводками), то вместо среднего месячного расхода воды используют средний расход за 30 суток (не календарный месяц) с наименьшим стоком в данном сезоне.

При наличии данных гидрометрических наблюдений минимальный расчетный расход определяют по теоретической кривой обеспеченности, рассчитанной по данным наблюдений. При недостаточной длине ряда наблюдений производят его удлинение методом аналогии.

Расчет минимальных расходов воды для неизученных рек производят на основе обобщенных зависимостей для нормы минимального стока и коэффициентов вариации и асимметрии, полученных по данным для изученных рек, или путем использования переходных коэффициентов от минимального стока определенной (фиксированной) обеспеченности к стоку искомой обеспеченности. За минимальный сток фиксированной обеспеченности принят [15] минимальный 30-суточный расход обеспеченностью  $P = 80 \%$ .

Для больших и средних рек минимальные 30-суточные расходы воды  $Q_{80\%}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) в зимний и летне-осенний периоды определяют для центра тяжести речного бассейна по картам изолиний.

Минимальные расходы расчетной обеспеченности (за 30 сут) определяют по формуле

$$Q_p \% = Q_{80 \%} \lambda_p \%, \quad (2.45)$$

где  $\lambda_p \%$  – переходный коэффициент от расхода фиксированной 80 %-й обеспеченности к расходу расчетной обеспеченности.

### **Вопросы для самопроверки**

#### **Речная система**

1. Какие водные объекты суши вы знаете?
2. Из каких элементов состоит речная система?
3. Что такое исток и устье реки?
4. Какие вы знаете основные формы сопряжения речных потоков с морем?
5. Что собой представляет «динамическая ось потока»?
6. Как называется линия, соединяющая точки с наибольшей поверхностной скоростью течения в живых сечениях потока?

#### **Общие сведения о реках**

7. Какие характеристики бассейнов относятся к физико-географическим характеристикам?
8. Какие характеристики бассейнов относятся к морфометрическим характеристикам бассейнов характеристикам?
9. Каким образом формируется речная долина?
10. Что такое русло реки? В чём его главное отличие от поймы?
11. Что представляют собой меандры?
12. Как называют линии равных глубин?
13. Как называется форма донного рельефа, сложенная наносами в виде широкой гряды пересекающая русло под углом к общему направлению течения, вызывающая отклонение его от одного берега к другому?
14. Какие виды питания рек вы знаете? Что служит основанием причисления питания реки к определённому типу?
15. Как называются характерные состояния водного режима реки, повторяющиеся в определённые гидрологические сезоны в связи с изменением условий питания?
16. Что называют половодьем на реке? Что к нему приводит?
17. Как называется фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в различные сезоны года, характеризуется интенсивным, кратковременным увеличением расходов и уровней воды и вызывается дождями или снеготаянием во время оттепелей?
18. Чем характеризуется такая фаза водного режима реки, как межень?
19. Перечислите ледовые явления, предшествующие периоду ледостава.

## Речной сток

20. Какие группы основных факторов, влияющих на речной сток, вы знаете?

21. Какие факторы, влияющие на речной сток, относятся к климатическим?

22. Какие факторы, влияющие на речной сток, относятся к географическим факторам?

23. Что обеспечивает перевод части склонового стока в почвенный и грунтовый?

24. К какой группе факторов относится: регулирование речного стока; снегозадержание; посадка лесополос; осушение болот; вырубка лесов?

25. Какие понятия применяют для характеристики речного стока в гидрологии?

26. Как называют средние значения годового стока за многолетний период, включающий несколько полных (не менее двух) циклов колебаний водности реки при неизменных географических условиях и одинаковом уровне хозяйственной деятельности в бассейне реки?

27. Что называют модулем стока?

28. Какие методы используют при изучении гидрологического режима водотоков и определении расчетных характеристик стока?

29. На чём основан метод научных гидрологических обобщений?

30. Как называется метод изучения гидрологического режима водотоков и определения расчетных характеристик стока, включающий в себя выяснение вероятностных закономерностей?

31. Какие показатели характеризуют кривую распределения вероятности?

32. Какие характеристики годового стока (и его внутригодового распределения) относятся расчетным гидрологическим характеристикам ?

33. При каких условиях продолжительность ряда наблюдений считается достаточной для установления расчетных значений гидрологических характеристик заданных обеспеченностей?

34. Какой метод используют при недостаточности гидрометрических данных для приведения к расчетному многолетнему периоду параметров кривых обеспеченности гидрологических характеристик ( $Q$ ,  $H$ ,  $K$ )?

35. Какие условия следует соблюдать при выборе рек-аналогов?

36. Когда формируется максимальный сток? Чем он обусловлен?

37. При расчётах каких сооружений необходимы максимальные расходы?

38. Когда формируется минимальный сток?

39. Для решения каких задач водного хозяйства необходимы минимальные расходы водотоков?

40. Какие вы знаете основные расчетные характеристики минимального стока? За какой период они определяются?

## 3. ГИДРОМЕТРИЯ

### 3.1. Общие положения

Гидрометрия является разделом более общей науки – гидрологии, и в ее задачи входят разработка приборов и методов количественного определения различных характеристик и систематическое изучение гидрологического режима водных объектов. Гидрометрические измерения служат для получения многолетних рядов наблюдений за уровнями, скоростями течений, элементами волн, расходами и стоком воды и наносов, температурным режимом, распределением плотности, химическим составом воды, ледовыми явлениями и т.д. [5, 9, 14].

Данные по гидрологическому режиму водных объектов необходимы для проектирования гидротехнических сооружений различного назначения (транспортных, энергетического, водозаборных и др.), планирования водопотребления, создания базы для научных обобщений. Получила развитие инженерная гидрометрия, в задачу которой входит организация наблюдений за режимом водных объектов при строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений, влияющих на естественный режим водоемов.

Гидрометрия подразделяется на гидрометрию атмосферных вод, гидрометрию океанов и морей, озер и водохранилищ, гидрометрию рек, подземных вод и т.д. Несмотря на определенную специфику, связанную с объектом изучения, в приемах и способах изучения характеристик рек и морей (водохранилищ и озер) есть достаточно много общего, поэтому в дальнейшем излагаются главным образом разделы речной гидрометрии.

Как правило, гидрометрические наблюдения как на реках, так и на морях, совмещаются с метеорологическими наблюдениями.

Для изучения гидрометеорологических явлений созданы постоянная и временная государственные сети станций и постов, проводятся экспедиционные работы. Государственная гидрометеорологическая сеть состоит из основных (или опорных) и специальных станций и постов.

На основных станциях и постах ведутся постоянные наблюдения за гидрометеорологическими и атмосферными процессами в течение длительного времени, иногда бессрочно. Специальные станции и посты организуются на определенный период для изучения местных условий, например гидрометеорологического режима водохранилищ и озер, устьевых участков реки и прилегающего взморья и др.

Государственная гидрометеорологическая сеть станций и постов находится в ведении Государственного комитета по гидрометеорологии на суше и на воде. Кроме государственной гидрометеорологической сети стан-

ций и постов существуют станции и посты различных ведомств (Минречфлот, Минморфлот, Минсельхоз, Минводхоз и др.).

*В состав основных гидрометеорологических работ на реках и водоемах входят:*

- наблюдения за уровнем и его колебаниями;
- промерные работы для изучения глубин и рельефа дна водных объектов;
- наблюдения за уклонами водной поверхности (на реках);
- наблюдения за температурой воды, замерзанием и вскрытием водоемов, состоянием ледяного покрова;
- измерение скоростей и направлений течений;
- наблюдение за цветом, прозрачностью, плотностью и химическим составом воды;
- измерение параметров волнения;
- определение расхода и стока воды и наносов;
- определение механического и петрографического состава наносов и донных отложений.

Данные гидрометеорологических наблюдений со всех станций и постов сосредотачиваются в Гидрометцентре страны, обрабатываются, анализируются и служат для решения различных научно-теоретических и хозяйственных проблем.

### 3.2. Измерение уровней

Высотное положение поверхности воды в данной точке относительно условной горизонтальной неизменной по высоте плоскости отсчета называется **уровнем воды**. Наблюдения над уровнем обычно ведут длительное время, поэтому условную плоскость помещают на 0,5...1,0 м ниже наименьшего возможного положения уровня (в водохранилищах – с учетом сработки, в морях – с учетом приливно-отливных и сгонно-нагонных колебаний), с тем чтобы отсчеты уровня были всегда положительными. Эта плоскость принимается за нуль отсчетов и называется **нулем графика водомерного поста**. Основные отсчеты положения уровня на реках в обычных условиях снимаются дважды в сутки – в 8 и 20 часов. В экстремальных условиях интервалы времени между сроками наблюдения сокращаются. Например, в период половодья и паводков на реках назначаются дополнительные сроки через 2, 4 и 6 часов. Данные, полученные в сроки наблюдений, называются срочными; срочный максимальный уровень может отличаться от мгновенного максимального уровня, который может быть между сроками наблюдения.

Место, оборудованное для наблюдения за уровнем, называют **водомерным постом**. Водомерные посты в зависимости от срока их действия

могут быть постоянными и временными. По своей конструкции водомерные посты могут быть простыми (речные, свайные и свайно-речные) и передаточными. Передаточные посты делятся на посты:

- с неавтоматическими и автоматическими отметчиками уровня воды;
- с непрерывной регистрацией положения уровня, т.е. с использованием самописцев, получивших название лимниграфов и мареографов, соответственно при измерениях на реках и на морях;
- с дистанционными устройствами, что позволяет вести регистрацию уровня на значительном расстоянии от водного объекта и осуществить работу водомерного поста в автоматическом режиме.

Высотное положение измерительных устройств водомерного поста требует систематического контроля, поэтому водомерный пост оборудуют основными и контрольными реперами. Реперы устанавливают в непосредственной близости от водомерного поста вне зоны затопления.

**Речный пост** представляет собой рейку, укрепленную на сооружениях (мостах, гидротехнических сооружениях и т.д.) в вертикальном положении, с ценой деления 2,0 см, что позволяет измерять уровень с точностью 1,0 см. Применяют рейки деревянные, металлические эмалированные и чугунные с эмалированными вкладышами делений шкалы. Последние два типа применяют для оборудования постоянных постов.

На пологих берегах и при отсутствии гидротехнических сооружений устраивают **свайные посты** в виде ряда свай, забитых в одном створе перпендикулярно течению реки или урезу воды в море (рис 3.1).

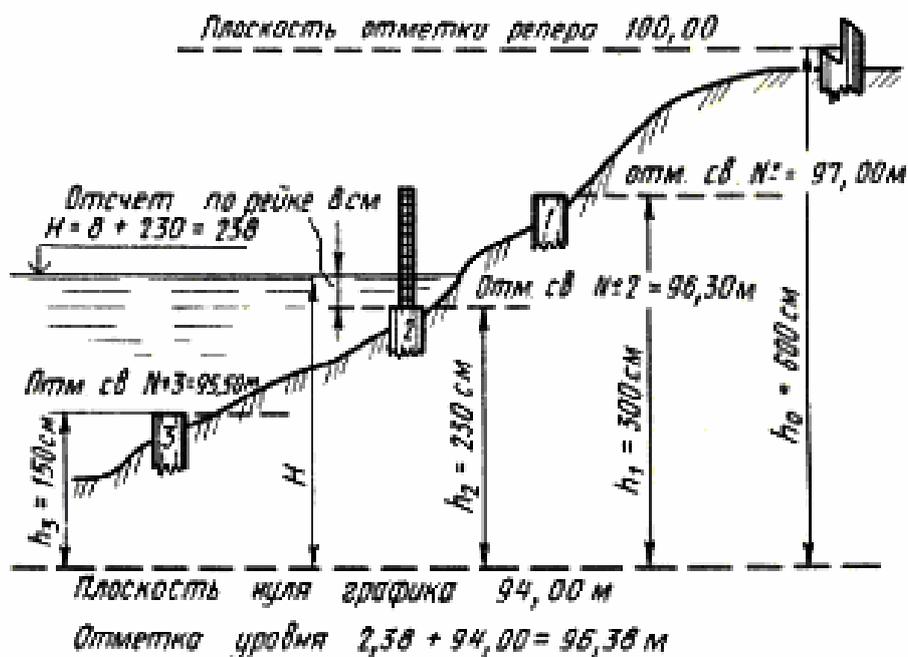


Рис. 3.1. Схема отметок и отчетов на свайном водомерном посту

Сваи могут быть деревянными, металлическими и железобетонными. В настоящее время посты оборудуют стандартными металлическими винтовыми сваями. Площадка самой верхней сваи должна быть на 0,25...0,5 м выше наивысшего исторического уровня, а площадка нижней сваи – на 0,5 м ниже наинизшего уровня.

Расстояние по вертикали между площадками смежных свай не должно быть более 0,8 м. Горизонтальные расстояния между сваями принимают, исходя из местных условий и удобства наблюдений, но не более 50 м. Сваи нумеруют сверху вниз.

Так как нуль рейки невозможно совместить с нулем поста, то после ее установки путем нивелирования определяют превышение нуля рейки над нулем графика поста, так называемую *приводку* (рис. 3.1).

Для повышения точности отсчета при малой амплитуде колебаний уровня в условиях горных рек, где набегание воды на рейку может исказить отсчеты по рейке, при наблюдениях на водохранилищах и морях для защиты от волнения рейку устанавливают на специальном открытом котловане, соединенном каналом с рекой или водоемом.

Для получения непрерывной информации об изменении уровня на реках и водоемах применяют самописцы уровня воды различной конструкции. Наибольшее распространение получили самописцы, в которых изменение уровня отслеживается с помощью поплавка, поднимающегося и опускающегося вместе с уровнем воды. Движение поплавка передается с помощью поплавкового колеса и шестерен барабану, который вращается на горизонтальной оси. На барабане закрепляется разграфленная бумага, на которой перо, перемещающееся вдоль образующей барабана с помощью часового механизма, вычерчивает ход уровня. Наибольшее распространение получил самописец «Валдай» (рис. 3.2).

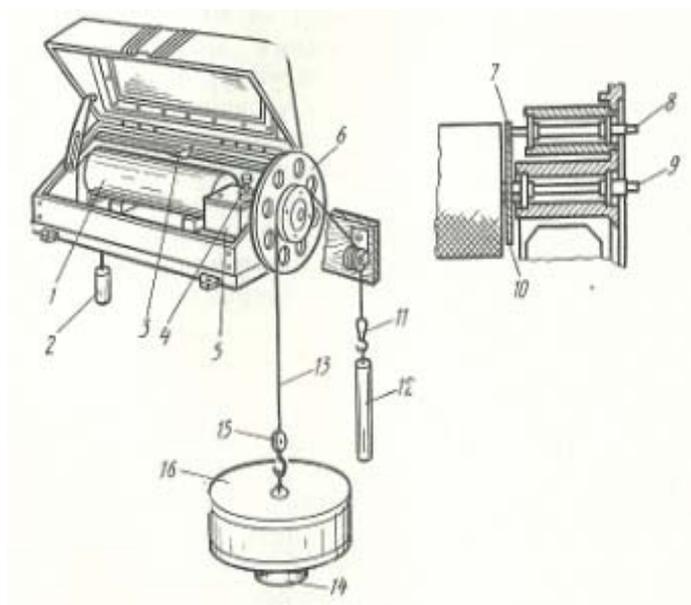


Рис. 3.2. Схема устройства самописца уровня «Валдай»:  
 1 – барабан; 2 – гиря; 3 – каретка с паром; 4 – заводная головка;  
 5 – часовой механизм;  
 6 – поплавковое колесо;  
 7 – трубка; 8 – основная ось прибора; 9 – вспомогательная ось прибора; 10 – шестерня;  
 11 – зажим; 12 – груз;  
 13 – трос; 14 – груз;  
 15 – зажим; 6 – поплавок

Самописцы устанавливают в специальных помещениях на берегу, на гидротехнических сооружениях или на специальном основании, например свайном. Поплавок размещается в колодце, шахте или трубе, сообщающихся с морем посредством устройств (трубы, отверстия), исключающих воздействие на поплавок короткопериодных (волновых) колебаний уровня.

Для определения уклона свободной поверхности воды в реке устраивают выше и ниже основного водомерного поста так называемые *уклонные посты*, расстояние между которыми  $L$  в зависимости от точности измерений меняется от 100 до 8000 м и отсчитывается по линии наибольших глубин. Уклон вычисляют из соотношения

$$I = (H_2 - H_1)/L, \quad (3.1)$$

где  $H_1$  и  $H_2$  – соответственно уровни в верхнем и нижнем створах.

При обработке данных наблюдений за ходом уровня на простых постах приводят измеренные уровни к нулю графика поста, вычисляют средние суточные значения уровней, составляют таблицы ежедневных уровней и строят графики изменения этих уровней во времени по годам.

Средние суточные уровни на простых постах определяют как средние арифметические из отсчетов уровня в 8 и 20 ч. При наличии дополнительных измерений средний суточный уровень находят как среднее арифметическое из всех отсчетов в течение суток.

### 3.3. Промерные работы

Задачей промерных работ является определение глубины и рельефа дна водных объектов.

**Глубиной** водного объекта называют расстояние по вертикали от поверхности воды до дна.

Промерные работы проводят с различными целями: при гидрографических исследованиях объектов, при гидрометрических работах, для нужд судоходства, при проектировании и эксплуатации различных гидротехнических сооружений, в связи с выправительными и берегозащитными работами на водных объектах.

Измерение глубин производят в отдельных точках или непрерывно по профилю дна. Их плановое расположение определяют привязкой к геодезической сети, которая создается при проведении промерных работ. Измерения глубин проводят на значительных по длине участках реки и больших площадях водоёмов, что определяет достаточно продолжительные сроки работ. За это время уровень водного объекта может измениться, и, чтобы связать между собой отдельные измерения глубин, они приводятся к единому, так называемому условному (срезочному) уровню. За условный уро-

вень принимают на реках наиболее низкий уровень, наблюдавшийся в период промерных работ.

Для получения поправки, или срезки  $\Delta H$ , надо определить разность отметок рабочего уровня  $H$  и мгновенно условного уровня  $h$ , т.е.

$$\Delta H = H - h. \quad (3.2)$$

Тогда значение глубины от условного уровня будет равно

$$d = h \pm \Delta H. \quad (3.3)$$

При измерении глубин применяют механический и акустический способы.

При **механическом способе измерения глубин** используют наметку, лоты ручной и механический. **Наметка** представляет собой деревянный шест длиной 6...7 м, диаметром 5...6 см, размеченный на дециметры белой и красной масляными красками. Нижний конец наметки заделывают в металлический башмак массой 0,5...1,0 кг. При илистых грунтах к нижнему торцу башмака приваривают поддон. Точность отсчетов глубин по наметке составляет 2...5 см, что зависит от грунтов дна, наличия волнения и скорости течения.

**Лот ручной** представляет собой металлический груз массой 2...5 кг с ушком в верхней части для крепления линия и углублением в дне для получения пробы грунта (с поверхности дна), для чего углубление смазывают мылом или солидолом. Лоты размечают марками на метры и дециметры. На реках лотом измеряют глубины до 25 м, в водоемах без течения – до 100 м. Точность отсчета глубин по лотлинию составляет 5...10 см.

**Механический лот** состоит из груза обтекаемой формы массой от 5 до 50 кг, стального троса диаметром 2,2...3,0 мм и ручной лебедки грузоподъемностью до 50 кг. Глубину механическим лотом измеряют со шлюпки или с катера при постановке на якорь или на ходу. В механических лотах отсчет глубины производят по счетчику, который фиксирует длину вытравленного троса. Для получения истинного значения глубины вводят поправку (со знаком минус), которая зависит от длины вытравленного над поверхностью воды троса, измеряемой специальным прибором – угломером.

В последнее время для измерения глубин широко применяют **эхолоты**, действие которых основано на посылке ультразвуковых импульсов от вибратора-излучателя в воду и приема отраженного от дна сигнала (эха) вибратором-приемником. Время распространения импульса от излучателя до дна и обратно до приемника пропорционально глубине. При измерении больших глубин излучатель и приемник монтируют стационарно в днище судна, при работе на малых глубинах используют эхолоты с выносным (за борт) устройством для установки излучателя и приемника. Зная расстояние

между ними  $2b$  (рис. 3.3) и глубину их погружения  $a$  под уровень воды,  $d$  (м) вычисляют по формуле

$$d = a + \sqrt{l^2 - b^2}. \quad (3.4)$$

Измерив время прохождения сигнала  $T$ , выражение (3.4) можно записать в виде

$$d = a + \sqrt{\frac{c^2 T^2}{4} - b^2}. \quad (3.5)$$

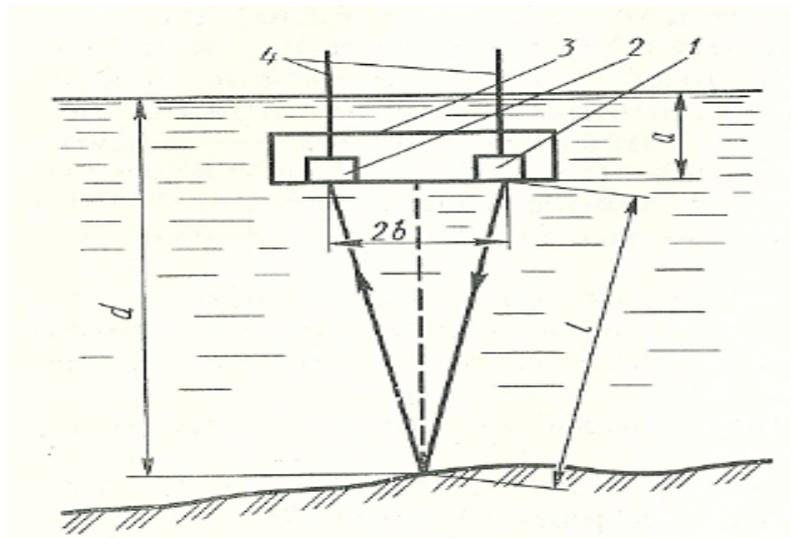


Рис. 3.3. Схема измерения глубины эхолотом:  
1 – вибратор-излучатель; 2 – вибратор-приемник;  
3 – заборное устройство; 4 – кабели

Скорость распространения звука в воде зависит от температуры и солености воды, поэтому перед началом работ проводят тарировку прибора, измеряя глубину механическим и акустическим способом, что позволяет вычислить поправку.

Измерения глубин ведут по поперечникам, продольникам и косым галсам на так называемых промерных вертикалях. Положение их в плане (координирование) выполняется: по натянутому вдоль створа тросу; засечками с берега угломерными геодезическими инструментами – теодолитами или кипрегелем на мензуге; засечкой секстаном с судна на ориентиры на берегу.

Для промеров по поперечникам на берегу параллельно урезу воды разбивают магистраль, и ее конечные пункты (реперы) привязывают к геодезической опорной сети. Поперечники разбивают перпендикулярно магистрали и закрепляют их положение на местности створными знаками. При ширине реки до 300 м и скорости течения не более 1,5 м/с промеры ведут по тросу, туго натянутому по створу и соответствующим образом разме-

ченному для определения положения промерных вертикалей. Работы ведут со шлюпки, которая движется вдоль троса.

На реках шириной более 200 м, озерах, водохранилищах и в прибрежной зоне моря положение промерных точек засекают двумя угломерными инструментами (рис. 3.4). Засечками определяют обычно только каждую пятую точку, положение остальных определяют, разделив расстояние между зафиксированными точками на равные части.

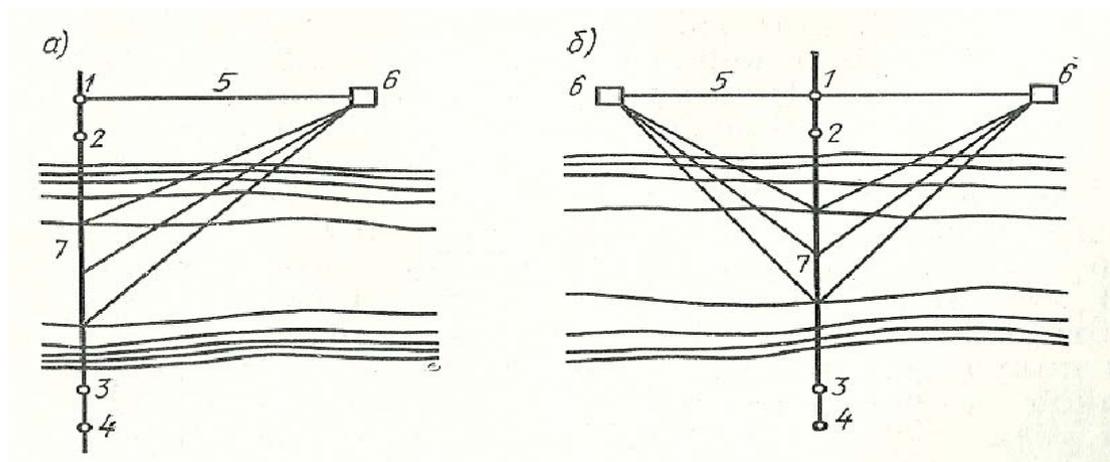


Рис. 3.4. Схема засечек промерных точек на створе одним (а) и двумя (б) инструментами:  
1...4 – створные знаки; 5 – базис; 6 – измерительный инструмент;  
7 – промерный створ

При большой длине поперечников применяют засечки с судна либо одного, либо двух ориентиров, двигаясь при этом по створу (рис 3.5), либо трех ориентиров, если створ не виден из-за большого расстояния. Зная величину углов  $\alpha$ ,  $\beta$ , легко определить положение промерной вертикали.

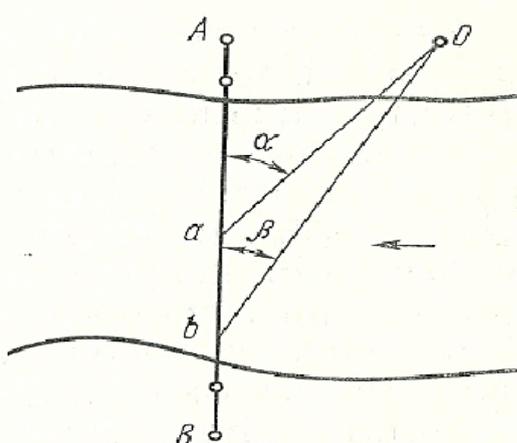


Рис. 3.5. Схема засечек точек секстаном:  
AB – промерный створ; O – береговой ориентир;  
 $a$ ,  $b$  – промерные точки;  $\alpha$ ,  $\beta$  – измеряемые углы

При производстве промерных работ на большом протяжении реки и значительной скорости течения применяют промер по косым галсам или

продольникам (рис. 3.6). При измерении глубины реки по продольникам шлюпка сплывает по течению, засечки промерных точек производят с базиса двумя угломерными инструментами.

При выполнении промерных работ эхолотами также разбивают магистральную линию и створы (поперечники, косые галсы или продольники). Положение катера на створе удобно определять по заранее установленным буям, проходя мимо которых, наблюдатель делает оперативную отметку на эхограмме.

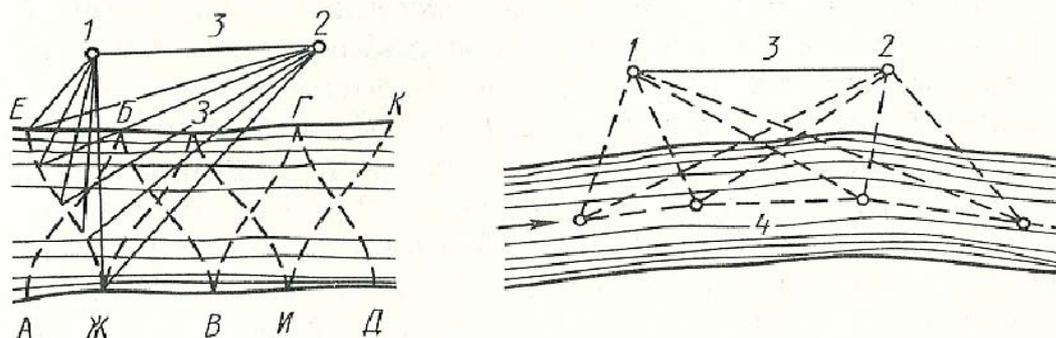


Рис. 3.6. Схема промеров косыми галсами и продольниками:  
1 – 1-я мензула; 2 – 2-я мензула; 3 – базис; 4 – продольник;  
АБ...ЖЕ – косые галсы

Обработка результатов промеров заключается

- в сличении и проверке записей в журнале;
- в определении расстояния каждой точки от начала поперечника, если координирование производилось методом засечек, определении поправки на относ троса и вычислении истинной глубины;
- в вычислении срезки и приведении глубин к условному уровню;
- в вычислении отметок дна во всех промерных точках;
- в определении характера и типа грунтов.

### 3.4. Измерение скорости течения воды

Скорости течения в реках, озерах, водохранилищах и береговой зоне моря могут измеряться различными способами с помощью приборов разного типа и конструкции.

Способы измерения скоростей течений могут быть разделены на две группы:

- способы поплавочные, при которых для определения течения наблюдают за движением плавающих предметов, естественных или искусственных (поплавков);
- способы вертушечные, при которых скорость течения определяют в фиксированной точке с помощью неподвижно установленных приборов по измерению давления потока воды на лопастные винты этих приборов.

Поплавочные способы позволяют получить пространственную картину течений в виде линий тока – траекторий движения поплавков. Вертушечный способ позволяет определить значение скорости течения в данной точке в условиях моря и направление вектора скорости.

В рассматриваемых условиях (реки и береговая зона моря) широкое распространение получили свободно плавающие поплавки. Эти поплавки подразделяют на поверхностные и глубинные. **Поверхностные поплавки** представляют собой простейшие приборы в виде отпиленных от бревна кружков высотой 5...7 см, крестовины из поставленных на ребро досок и т.п. Для лучшей видимости на поплавках закрепляют яркие флажки и для повышения устойчивости и снижения влияния ветра снизу крепят на тропике (или шнуре) соответствующий груз. **Глубинные поплавки** применяют для измерения скорости и определения течения на заданной глубине. Глубинные поплавки состоят из двух поплавков, связанных между собой; из них верхний находится на поверхности воды, а нижний – на заданной глубине. Верхний поплавок должен иметь некоторую избыточную плавучесть, его делают обычно из пробки или пенопласта, чтобы поддержать в заданном положении нижний поплавок, который обладает небольшой отрицательной плавучестью.

Чтобы измерить поплавками скорость течения на реке, предварительно разбивают магистраль на берегу и четыре створа, расположенные по нормали к течению (рис. 3.7) и закрепленные створными знаками. Створы привязывают к магистрали и измеряют расстояние  $L$  между створами. Поплавки выпускают поочередно (15...20 шт.). При прохождении поплавок через створ определяют его расстояние от магистрали  $b$  методом засечек угломерными инструментами. Зная время прохождения  $T_i$  поплавок от створа 2 до створа 4, находят  $v_{\max} = L/T$  и, зная  $b$ , строят эпюру поверхностной скорости по ширине реки. Прделав аналогичную операцию на других створах, можно построить траекторию движения поплавков.

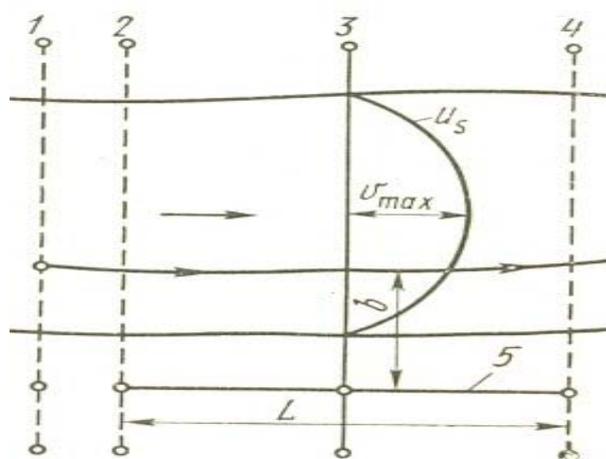


Рис. 3.7. Схема измерения скоростей течения воды поверхностными поплавками: 1 – пусковой створ; 2 – верхний створ; 3 – главный створ; 4 – нижний створ; 5 – магистраль

Скорость течений на поверхностных горизонтах определяют с помощью глубинных поплавков в том же порядке и теми же способами, что и при изучении поверхностных течений.

Среднюю скорость на вертикали  $u_v$  можно рассчитать с помощью поплавка-интегратора, имеющего плотность меньше плотности воды, что определяет скорость всплытия поплавка  $\omega'$  (эту скорость находят испытанием поплавка в спокойной воде).

Так как

$$\omega' = h/t, \text{ то } u_v = l/t, \quad (3.6)$$

следовательно, чтобы вычислить  $u_v$ , надо измерить величину горизонтального сноса поплавка  $l$  и глубину потока  $h$  или время всплытия  $t$ .

Для измерения течений на реках и морях широко используют так называемые **гидрометрические вертушки (ГВ)**, которые конструктивно состоят из рабочего колеса с вертикальной или горизонтальной осью вращения, корпуса, счетно-контактного механизма, хвостового оперения и в морской вертушке – указателя направления течения. Датчиком скорости гидрометрической вертушки является рабочее колесо, частота вращения которого зависит от скорости течения  $n = n(u)$  или  $u = u(n)$ . Зная число оборотов рабочего колеса  $N$  за  $T$  секунд, можно найти  $n = N/T$  и по тарировочной кривой определить  $u$ .

Наибольшее распространение в практике измерения скоростей течения в реках получили вертушки Н.Е. Жестовского с горизонтальной осью вращения ГР-55 (рис. 3.8).

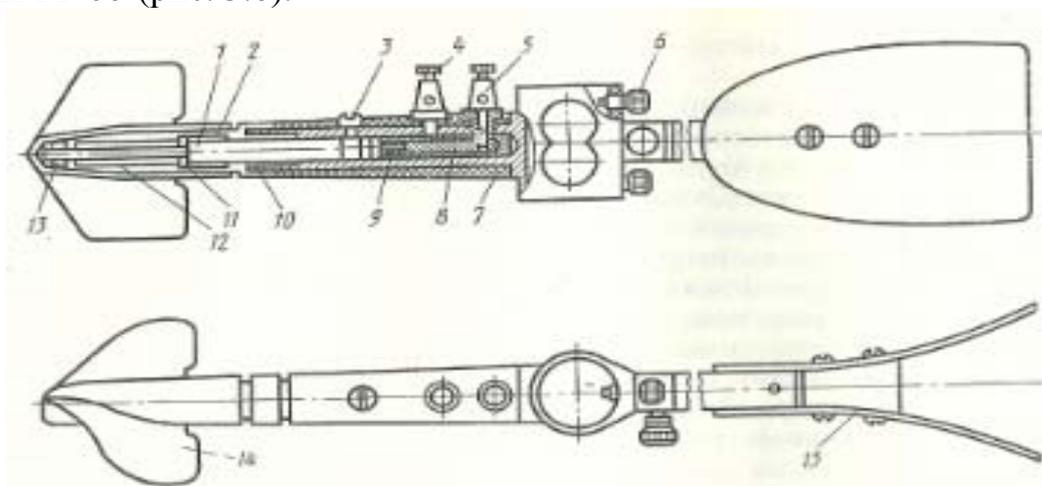


Рис. 3.8. Устройство гидрометрической вертушки ГР-55:

- 1 – ось с контактным механизмом; 2 – червячная шестерня с двадцатью зубцами и штифтом; 3 – стопорный винт; 4 – вывод массы;
- 5 – изолированный вывод; 6 – зажимные винты; 7 – корпус; 8 – штепсельное гнездо; 9 – токопроводящий стержень, изолированный от массы;
- 10 – зажимная муфта; 11 – радиальные шарикоподшипники;
- 12 – упорная втулка; 13 – осевая гайка; 14 – лопастной винт;
- 15 – стабилизатор направления

Вертушки типа ГР закрепляют на штанге при глубине до 3 м или на тросе при большей глубине. В последнем случае к вертушке подвешивают груз, чтобы уменьшить снос вертушки течением.

Измерение скорости течения вертушками можно производить точечным или интеграционным способом. При очечном способе скорость измеряют в строго фиксированной точке потока. При интеграционном способе измеряют осредненную скорость по какому-либо направлению. Например, если гидрометрическую вертушку перемещать в потоке по вертикали, то можно сразу определить среднюю скорость по вертикали. Более часто применяют точечный метод, который позволяет получить значения скорости потока в различных точках на вертикали и построить эпюру скоростей.

Наиболее часто измеряют скорость в пяти точках: у поверхности, на 0,2; 0,6; 0,8 глубины и у дна. При наличии ледяного покрова или растительности прибавляют шестую точку на глубине 0,4d.

При измерении скорости в *пяти точках* на вертикали среднюю скорость вычисляют по формуле

$$\overline{U}_v = 0,1 \cdot (u_s + 3u_{0,2} + 3u_{0,6} + 2u_{0,8} + u_b), \quad (3.7)$$

где  $u_s$ ,  $u_b$  – соответственно измеренные скорости у поверхности и дна.

При наличии ледяного покрова или развитой водной растительности в скобках добавляют член  $2u_{0,4}$  и коэффициенты при  $u_s$  и  $u_b$  принимают равными 2.

Время измерения местных скоростей на вертикалях по стандарту принято не менее  $T_0 = 100$  секунд при средних значениях величины турбулентной пульсации. На горных реках и у дна время измерения скоростей увеличивается и может достигать 10 мин.

Для измерения скорости течения реки с целью определения расхода выбирают гидрометрический створ-поперечник перпендикулярно среднему направлению течения реки в этом сечении.

В непосредственной близости от гидрометрического створа должны быть оборудованы водомерный пост и уклонные водомерные посты. Должны быть предусмотрены средства для проведения измерений на створе (гидрометрические мостики, лодки и т.п.). На гидрометрическом створе намечают положение скоростных вертикалей, расстояние между которыми зависит от ширины реки и профиля дна и составляет 2...10 м для реки шириной менее 200 м и 20...50 м при ширине реки более 200 м. Скоростные вертикали закрепляют на местности различными способами в зависимости от ширины реки. На скоростных вертикалях измеряют глубины, строят профиль дна реки и вычисляют площадь живого сечения реки. По измерениям на уклонных водомерных постах вычисляют уклон поверхности воды. Скорость измеряют обычно одной гидрометрической вертушкой, последовательно перемещаемой в различные точки вертикали. Предвари-

тельно на скоростной вертикали определяют уровни воды в начале и в конце работы на вертикали, глубины на вертикали (зимой – от нижней поверхности льда), далее вычисляют рабочую глубину и глубину погружения вертушки.

По данным измерений скоростей на каждой вертикали строят эпюру скоростей, для чего в точках измерения откладывают в определенном масштабе значение скорости и концы векторов соединяют плавной кривой (рис. 3.9, б).

Распределение скоростей по живому сечению наглядно представляется линиями равных скоростей – *изотаксами*. Для их построения на вычерченном поперечном сечении реки наносят скоростные вертикали, в точках измерения скоростей выписывают их значения. Методом интерполяции проводят изотаксы через равные значения скорости, которые принимают 0,05...0,5 м/с в зависимости от скорости течения (рис. 3.9, а). Расстояния между изотаксами уменьшаются от поверхности ко дну в связи с увеличением градиента скорости в этом направлении (рис. 3.9, б).

Полученные гидрологические и гидравлические характеристики потока (реки) позволяют перейти к определению расхода.

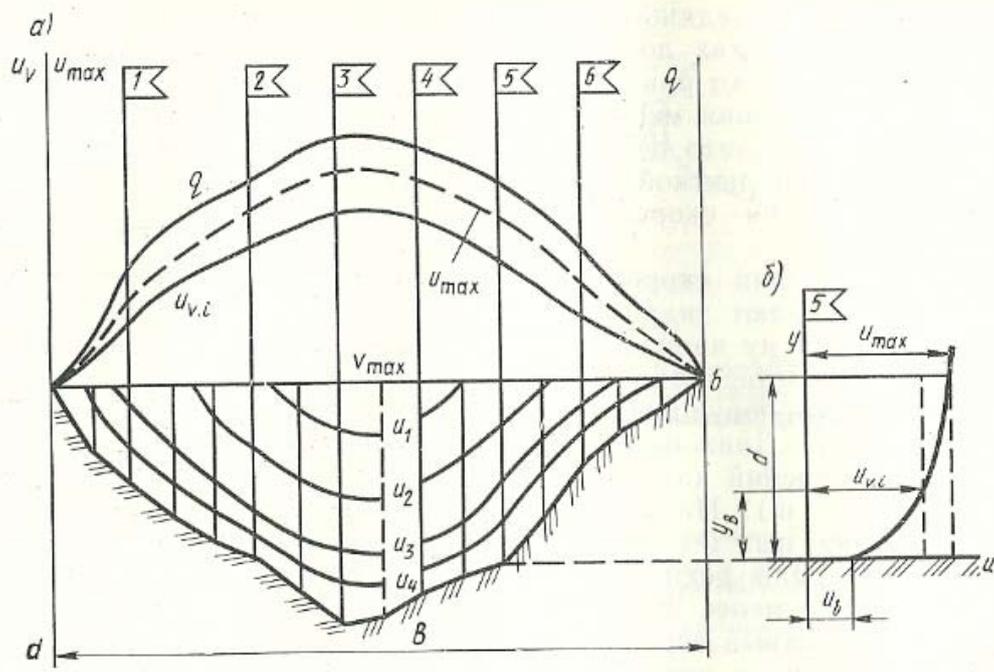


Рис. 3.9. Распределение скоростей и расходов в живом сечении безнапорного потока:

а – изотаксы, распределение скоростей и расходов; б – эпюра скоростей

В морских условиях скорости течений измеряют гидрометрическими вертушками и самописцами. Наибольшее распространение при работах в береговой зоне получила вертушка морская модернизированная (ВММ), которая является концевой вертушкой одноразового действия – после каждого измерения ее поднимают для снятия отсчетов и перезарядки. В отли-

чие от ГР-55 вертушка ВММ, закрепленная всегда на тросе, свободно вращается на оси.

### 3.5. Определение расходов воды

Численно расход воды в реке равен произведению скорости на площадь. Поскольку скорости в реке меняются от точки к точке по площади живого сечения, следует записать расход через элементарную площадку

$$dQ = u dx dy, \quad (3.8)$$

если плоскость координат  $XOY$  совместить с плоскостью живого сечения реки, ось  $x$  совместить с поверхностью воды и ось  $y$  направить вертикально вниз. Тогда полный расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ , будет равен

$$Q = \int_0^B \int_0^d u dx dy, \quad (3.9)$$

где  $B$  – ширина реки,  $d$  – глубина реки.

Численно расход воды в реке равен объему, ограниченному живым сечением, поверхностью воды и криволинейной поверхностью, касательной к концам векторов скоростей, проведенных нормалью к элементарным площадкам  $dx dy$  (рис. 3.10). Этот объем называют моделью расхода потока жидкости.

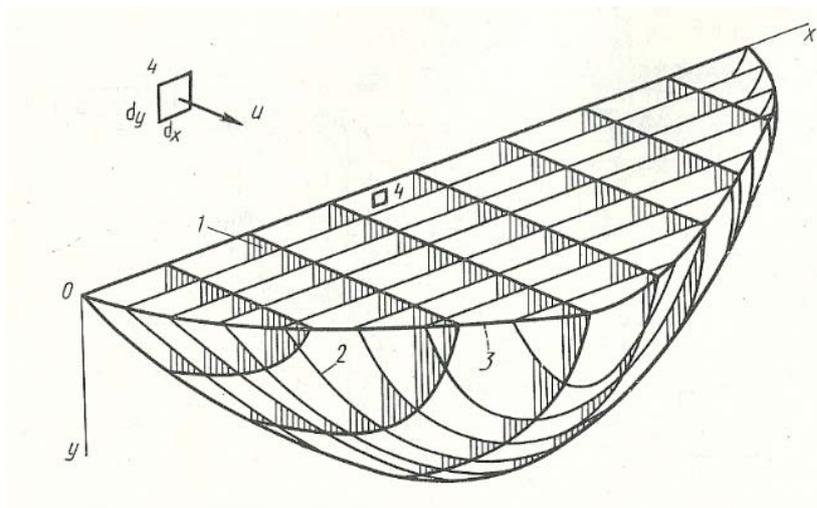


Рис. 3.10. Модель расхода жидкости:  
1 – вертикальный профиль скоростей; 2 – изотахи; 3 – эпюра распределения поверхностных скоростей; 4 – элементарная площадка

Выражение (3.9) можно записать в виде

$$Q = \int_0^B q dx, \quad (3.10)$$

где  $q$  – элементарный расход на скоростной вертикали.

Это выражение дает возможность вычислить расход реки, если известны элементарные расходы на вертикалях. Если поле скоростей представлено системой изотак, то расход вычисляется по формуле

$$Q = \int_0^{U_{\max}} \omega_i du, \quad (3.11)$$

где  $\omega_i$  – площадь, ограниченная изотаксой со скоростью  $u_i$ ;  
 $u_{\max}$  – наибольшая скорость в потоке.

Существует большое количество способов определения расхода воды в потоке. Все они могут быть разделены на прямые, когда расход измеряется с помощью мерного сосуда, заполняемого за время  $T$ , и косвенные, когда измеряется не сам расход, а параметры, его определяющие.

Из указанных способов определения расхода наибольшее распространение получил гидрометрический метод. При этом расход может быть вычислен по измеренным глубинам и скоростям или по уклону и площади. Чаще применяют первый способ. В этом случае расход вычисляют по зависимостям (3.9)...(3.11). Поскольку при этом необходимо располагать данными измерений скорости и глубины в реке, этот метод получил название «скорость – площадь». На практике интегрирование заменяется суммированием, и расход вычисляется либо аналитическим, либо графическим способами.

При аналитическом способе интеграл (3.11) записывают в виде

$$Q = \int_0^{\omega} u d\omega \quad (3.12)$$

и представляют как сумму:

$$Q = k u_{v1} w_1 + 0,5 w_2 (u_{v1} + u_{v2}) + \dots + 0,5 (\bar{u}_{v(n-1)} + \bar{u}_{vn}) + k \bar{u}_{vn} w_{n+1}. \quad (3.13)$$

Число скоростных вертикалей принимается от 10 до 20.

Также в виде суммы может быть записано выражение (3.10):

$$Q = k q_1 b_1 + 0,5 b_2 (q_1 + q_2) + 0,5 b_n (q_{n-1} + q_n) + k q_n b_{n+1}, \quad (3.14)$$

где  $k$  – коэффициент для скоростей (или расходов) на прибрежных вертикалях, равный 0,7 при отлогих берегах и 0,8 при обрывистых берегах;

$u_{v,1}, u_{v,2}, \dots, u_{v,n}$  – средние скорости на вертикалях, вычисляемые по формуле (3.8);

$q_1, q_2, \dots, q_n$  – расходы на вертикалях, вычисляемые по формуле

$$q_i = u_{vi} d_i.$$

При измерении расхода  $Q$  (скоростей течения) отмечается положение уровня воды, соответствующее этому расходу, – так называемый расчетный уровень  $H_{cal}$ . Если уровень в реке за время производства измерений изменяется меньше чем на 5...10 % от преобладающей глубины на створе, то за  $H_{cal}$  принимают средний арифметический из измерений до начала и по окончании измерений. В противном случае  $H_{cal}$  рассчитывают по формулам

- при равномерном распределении скоростных вертикалей по ширине реки:

$$H_{cal} = (q_1 H_1 + q_2 H_2 + \dots + q_n H_n) / \sum_1^{i=n} q_i; \quad (3.15)$$

- при расстояниях между вертикалями, различающихся более чем на 25 %:

$$H_{cal} = (q_1 b_1 H_1 + q_2 b_2 H_2 + \dots + q_n b_n H_n) / \sum_1^{i=n} q_i b_i, \quad (3.16)$$

где  $q_i$  и  $H_i$  – расходы и уровни на вертикалях;

$b_i$  – расстояние между серединами интервалов между вертикалями.

При расчете расхода  $Q$  по изотам определяют площади между изотами и по их значениям строят так называемую тахиграфическую кривую  $u = u(\omega_i)$ , где  $\omega_i$  – площадь, ограниченная поверхностью воды и определенной изотой (рис. 3.11, а). При скорости  $u = u_{max}$  (на поверхности) площадь  $\omega_i = 0$ ; при  $u = u_b$  (у дна) площадь  $\omega_i$  равна площади живого сечения реки  $\omega$ . Площадь, ограниченная осями координат и тахиграфической кривой, численно равна расходу воды:  $dQ = u d\omega$ .

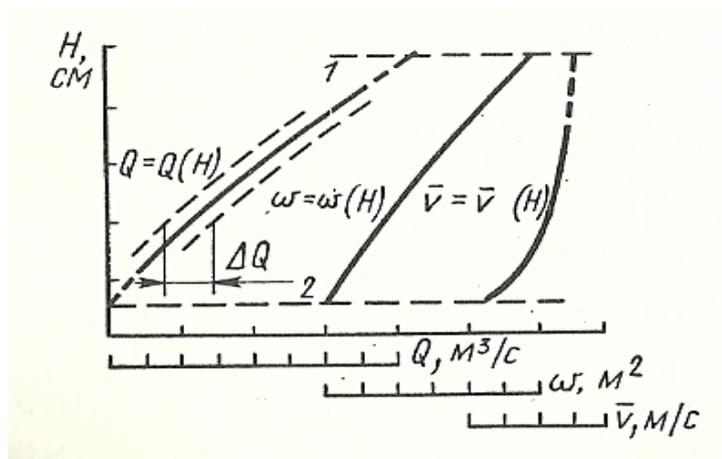


Рис. 3.11. Кривые расходов  $Q = Q(H)$ , площадей  $\omega = \omega(H)$  и скоростей  $u = u(H)$ :  
1 – уровень высоких вод; 2 – уровень низких вод

С изменением расхода реки меняется уровень воды, и может быть установлена функциональная связь уровня от расхода воды. Практически эту связь удобнее записывать в виде  $Q = Q(H)$ . Если шероховатость русла и уклон поверхности воды остаются постоянными, то согласно уравнениям равномерного движения зависимость уровня воды от расхода будет однозначной, т.е. каждому значению расхода соответствует одно значение уровня. Эта зависимость, выраженная графически, носит название **кривой расхода**, которая может быть построена по экспериментальным точкам (рис. 3.11). Аналогично кривой расходов могут быть построены **кривые площадей** (рис. 3.11) живого сечения реки  $\omega = \omega(H)$  и **кривые средних скоростей потока**  $u_r = u(H)$ , причем  $100\Delta u_r / (2u_r) < 2...3\%$  и  $100\Delta\omega / (2\omega) < 2...3\%$ . Связь между этими кривыми определяется соотношением  $Q = u_r\omega$  при любом уровне.

Формула для определения расхода по известному уровню предлагается в виде

$$Q = a(H + H_0)^m, \quad (3.16)$$

где  $H_0$  – уровень при нулевом расходе, вычисляемый аналитически:

$$H_0 = (H_2^2 - H_1 H_3) / (H_1 + H_2 + H_3).$$

Здесь  $H_1, H_2, H_3$  – уровни, соответствующие малым, средним и высоким расходам и снятые с кривой расходов.

Параметры  $a$  и  $m$  определяют в логарифмических координатах соответственно как отрезок на вертикальной оси ( $\lg a$ ) и тангенс угла наклона ( $m$ ).

Располагая надежной связью между расходами и уровнями, можно легко определять расходы, измеряя только уровни, что резко облегчает и ускоряет работы на створе.

Наблюдения на водомерных постах за уровнями ведутся ежедневно, а при значительных колебаниях уровня – несколько раз в сутки. Измерения же расходов воды производить сложно, поэтому их выполняют редко, через определенные интервалы колебаний (на подъеме и спаде) уровней. Расходы и уровни тесно связаны.

Для построения кривой расходов измеренные расходы воды и гидравлические элементы водотока (площади живых сечений, средние скорости, уклоны) заносят в ведомость. Перед тем как приступить к построению кривой расходов, необходимо проанализировать исходные материалы. Опорными являются расходы, измеренные вертушкой и пятиточечным способом. Менее достоверны расходы, измеренные сокращенным способом и поплавками. При анализе расходов необходимо установить, зарастает ли русло, каковы деформации в рабочем створе, какая была погода при измерении каждого расхода (сила ветра, его направление).

Построение кривой расходов в открытом незарастающем русле выполняют на стандартном листе миллиметровой бумаги, где по оси ординат от-

кладывают вычисленные отметки рабочих уровней за время измерения каждого расхода. Уровни принимают в абсолютных отметках или над нулем графика. По оси абсцисс откладывают измеренные при соответствующих уровнях расходы воды. Масштабы уровней расходов выбирают так, чтобы угол наклона кривой к осям координат не был слишком острым (около 40–45°). В точке пересечения координат вычерчивают кружок, возле которого выписывается номер расхода. Обычно точки расходов образуют неширокую полосу. Ширина полосы определяет разброс точек из-за допущенных ошибок измерения (2–5 % величины расхода) или из-за колебания гидравлических элементов потока (уклонов, шероховатости русла и т.д.). Все нанесенные точки разбивают по отдельным интервалам на группы. В каждой группе точек по среднеарифметическому из уровней и расходов определяют центр тяжести. Центры тяжести всех групп соединяют плавной кривой.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Каковы задачи гидрометрии?
2. Что входит в состав Государственной гидрометеорологической сети?
3. Какие наблюдения ведутся на основных станциях и постах в течение длительного времени, иногда бессрочно?
4. Как часто снимаются основные отсчеты положения уровня на реках в обычных и критических условиях?
5. Что представляет собой основное оборудование речного поста?
6. Какова задача проведения промерных работ?
7. Что представляют собой наметка, ручной и механический лоты, которые используются при механическом способе измерения глубин?
8. Какой способ измерения скоростей позволяет получить пространственную картину течений в виде линий тока?
9. Что собой представляют поверхностные поплавки?
10. Чем глубинные поплавки отличаются от поверхностных?
11. Что является датчиком скорости в гидрометрической вертушке?
12. На каких глубинах наиболее часто измеряют скорость в сечениях створа при вертушечном методе измерения скоростей?
13. Как называется линиями равных скоростей в живом сечении речного потока?
14. Какие известны способы определения расхода воды?
15. На измерении каких величин основан гидрометрический метод определения расхода воды?

## 4. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

### 4.1. Задачи и виды регулирования стока

**Регулированием речного стока** называют искусственное перераспределение речного стока в пространстве или во времени в соответствии с требованиями водопотребителей или водопользователей. Перераспределение стока в пространстве связано с переброской стока водного объекта в другой, чаще смежный, бассейн. Перераспределение стока во времени выражается в увеличении или уменьшении стока в отдельные периоды времени по сравнению с естественным бытовым режимом.

Необходимость воздействия на естественный режим стока в целях более полного и рационального использования водных ресурсов вызвана неравномерным распределением водных ресурсов на территории страны, стока в пределах года и стока по годам (многоводные и маловодные годы).

В интересах водоснабжения чаще осуществляют регулирование речного стока во времени, а регулирование речного стока в пространстве более характерно для интересов водного транспорта. Далее будем рассматривать только регулирование во времени.

Регулирование речного стока решает две основные задачи:

- повышение стока в многолетний период или трансформирование внутригодового стока для повышения надёжности водопотребления или водопользования;
- уменьшение максимальных расходов половодий и паводков для устранения наводнений и схода селевых потоков на участках реки, расположенных ниже гидроузла, и для сокращения размеров водосбросных сооружений.

Преобразование гидрологического режима водотоков осуществляется путём создания искусственных водоёмов – водохранилищ. При их проектировании необходимо научное и водохозяйственное обоснование гидротехнических мероприятий, которое проводится в рамках сравнительно новой научной дисциплины – теории регулирования и использования речного стока. Эта дисциплина фактически начала формироваться в XX веке. В её развитии значительную роль сыграли русские и советские учёные М.В. Потапов, С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель, А.Д. Саваренский, В.А. Бахтиаров, Я.Ф. Плешков, Н.А. Картвелишвили, Г.Г. Сванидзе, Д.Я. Раткович и другие.

Основными разделами теории регулирования стока являются:

- гидрологические расчёты, выполняемые для определения гидрологических характеристик водного объекта в его естественном и зарегулированном состоянии;
- водохозяйственные расчёты по определению основных размеров водохранилища;
- использование водных ресурсов, т.е. разработка правил регулирования стока и эксплуатации водохранилища.

При проектировании и эксплуатации водохранилища большое внимание уделяется анализу явлений, вызываемых нарушением естественного режима реки при сооружении водохранилища:

- потери воды из водохранилища на фильтрацию и испарение [11, 14];
- отложение наносов и заиление водохранилищ [4, 5, 11];
- изменение уровня и ледового режимов [4];
- изменение качества воды [5].

По степени регулирования стока различают водохранилища: суточного, недельного, годового (сезонного) и многолетнего регулирования.

Водохранилища суточного и недельного регулирования перераспределяют обычно равномерный приток в течение суток и недели в неравномерную отдачу воды из водохранилища за указанные промежутки времени.

Водохранилища годового (сезонного) регулирования перераспределяют сток в течение года, задерживая часть паводковых вод и повышая за счет накопления воды расходы водотока в маловодные сезоны или месяцы данного года.

Водохранилища многолетнего регулирования перераспределяют сток в течение периода, охватывающего несколько лет, задерживая часть стока многоводных лет и повышая за счет накопленного объема воды расходы водотока в маловодные годы.

Как правило, водохранилища многолетнего регулирования одновременно служат и для годового (сезонного), недельного и суточного регулирования, а водохранилища годового регулирования – для недельного и суточного.

Водохранилища суточного и недельного регулирования опорожняются и заполняются соответственно в течение суток, недели; водохранилища годового (сезонного) регулирования, как правило, ежегодно сбрасываются до определенной отметки, от которой в период паводка начинает заполняться водохранилище.

В водохранилищах многолетнего регулирования только часть полезной емкости ежегодно опорожняется и наполняется; полная сработка водохранилища многолетнего регулирования происходит к концу маловодного ряда лет.

Заключение о виде регулирования делают применительно к известному ходу стока в конкретный период. Критерием для определения вида регулирования служит соотношение между отдачей (водопотреблением из водохранилища)  $U_{P\%}$  и годовым стоком  $W_{P\%}$  расчётной обеспеченности: при  $U_{P\%} \leq W_{P\%}$  принимают сезонное регулирование, при  $U_{P\%} \geq W_{P\%}$  – многолетнее.

## 4.2. Характерные режимы, объёмы и уровни воды в водохранилище

При возведении в русле реки преграды перед ней начинает подниматься уровень воды до тех пор, пока расход русла не сравняется с расходом водопропускных отверстий преграды или с расходом, переливающимся через эту преграду. Таким образом создаётся водохранилище. **Водохранилище**

представляет собой искусственный водоём, образованный в результате возведения в речном потоке преграды в виде плотины [2, 14]. При этом часть водного потока, расположенного по течению реки выше плотины, называют **верхним бьефом (ВБ)**, ниже плотины – **нижним бьефом (НБ)**.

**Режим работы водохранилища** определяется последовательным чередованием периодов его **наполнения** (возрастание объёма, уровня воды), **сработки** (снижение объёма, уровня воды) и **стояния уровня** (сохранение объёма, уровня воды). Продолжительность и очерёдность этих периодов обусловлены соотношением притока воды в водохранилище и потребления воды из него: превышение притока воды над водопотреблением за определённый период называют избытком воды; превышение водопотребления над притоком – недостатком. При наличии в течение гидрологического года одного периода избытков воды и одного – недостатков, а также при превышении суммарных избытков за рассмотренный период над суммарными недостатками, говорят о годовом регулировании стока и об **однотактной работе водохранилища**: наполнение – сработка – стояние уровней. В противном случае применяют многотактную работу водохранилища.

Объём водохранилища устанавливается в результате водохозяйственного расчёта. Полный объём водохранилища определяют с учётом потерь воды на испарение и фильтрацию:

$$W_{\text{полн}} = W_{\text{рег}} + W_{\text{МО}} + W_{\text{исп}} + W_{\text{фил}}, \quad (4.1)$$

где  $W_{\text{рег}}$  – регулирующий объём воды в водохранилище (полезный), систематически используемый для перераспределения притока воды в водохранилище. При однотактной работе водохранилища регулирующий объём определяют суммой годовых недостатков воды.

$W_{\text{МО}}$  – мертвый объём водохранилища или объём мутных вод. Он не используется для регулирования стока и не срабатывается в нормальных условиях эксплуатации. Он определяется объёмом твёрдых наносов, которые осядут в водохранилище за расчётный период эксплуатации [9, 11, 14]:

$$W_{\text{МО}} = \frac{W_0}{\gamma_n} (1 - \alpha) T, \quad (4.2)$$

где  $W_0$  – вес взвешенных наносов, приходящих в расчётный створ за год;

$\gamma_n$  – объёмный вес взвешенных наносов,  $\gamma_n = 1,2 \dots 1,4 \text{ т/м}^3$ ;

$T$  – расчётное время заиливания,  $T = 20$  лет;

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий транзитный сброс взвешенных наносов,  $\alpha = 0,30$ ;

$W_{\text{исп}}$  – потери воды на испарение для года расчётной обеспеченности;

$W_{\text{фил}}$  – потери воды на фильтрацию.

Потери воды на испарение и фильтрацию определяются приблизительно ежемесячно с учетом соответственно слоя испарения (по метеорологическим данным) и слоя фильтрации (по данным о грунтах ложа водохранилища), а также по данным о площади зеркала водохранилища при среднемесячных уровнях воды.

**Характерные уровни воды в водохранилище** определены с использованием кривых зависимости объемов и площадей зеркала воды в водохранилище от отметок в створе плотины, которые называют топографическими характеристиками водохранилища и получают по результатам топографической съёмки на этапе изысканий.

Отметка **нормального подпорного уровня** воды в водохранилище ( $\nabla$ НПУ) соответствует полному наполнению водохранилища при нормальных условиях эксплуатации.

Отметка **форсированного подпорного уровня** воды в водохранилище ( $\nabla$ ФПУ) назначается с учетом кратковременного допустимого подъёма воды над НПУ при пропуске паводковых расходов (из условия работы водосбросного сооружения). В отдельных случаях при недостаточной изученности района строительства на небольших прудах допускается принимать слой форсировки равным 1,0 % от напора перед плотиной при стоянии НПУ.

Отметка **уровня мёртвого объёма** ( $\nabla$ УМО) определяется при величине мёртвого объёма по топографическим характеристикам водохранилища. Это минимальная отметка сработки водохранилища при нормальных условиях его эксплуатации.

### Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под регулированием речного стока?
2. Путём создания водохранилищ осуществляют перераспределение стока во времени или пространстве?
3. Какие нарушения естественного режима реки происходят при сооружении водохранилища?
4. Какие виды регулирования стока могут быть использованы при создании водохранилищ?
5. Если водохранилище перераспределяет сток в течение года, задерживая часть паводковых вод и повышая за счет накопления воды расходы водотока в маловодные сезоны или месяцы данного года, то какой вид регулирования использован для его создания?
6. Когда происходит полная сработка полезной ёмкости водохранилища многолетнего регулирования?
7. Где расположена часть водного потока, называемая верхним бьефом?
8. Назовите фазы режима работы водохранилища.

9. Из каких составных частей состоит полный объём водохранилища?
10. Какие виды потерь воды из водохранилища следует учитывать при определении его ёмкости?
11. Для каких целей предусматривают мертвый объём в водохранилищах?
12. Каким расчётом определяют величину регулирующей ёмкости водохранилища, созданного для целей водоснабжения? Чем обусловлена величина этой ёмкости?
13. Какие характерные уровни воды в водохранилище вы знаете?
14. Отметке какого уровня соответствует полное наполнение водохранилища при нормальных условиях эксплуатации?
15. Какова продолжительность затопления земель в верхнем бьефе, имеющих отметку, близкую к отметке форсированного подпорного уровня?

## 5. ГИДРОЛОГИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ И ОЗЕР

Водоохранилище – это искусственный водоем, созданный для накопления и последующего использования воды и регулирования стока рек. Их стали строить в глубокой древности, примерно за три тысячи лет до нашей эры. В двадцатом веке они появились повсеместно, и в настоящее время насчитывается более шестидесяти тысяч водохранилищ по всему земному шару.

### 5.1. Типы водохранилищ и озер

#### 5.1.1. Типы водохранилищ

Водоохранилища могут быть подразделены на типы (рис. 5.1) по характеру ложа, способу его заполнения водой, географическому положению, месту в речном бассейне, характеру регулирования стока [5, 11].

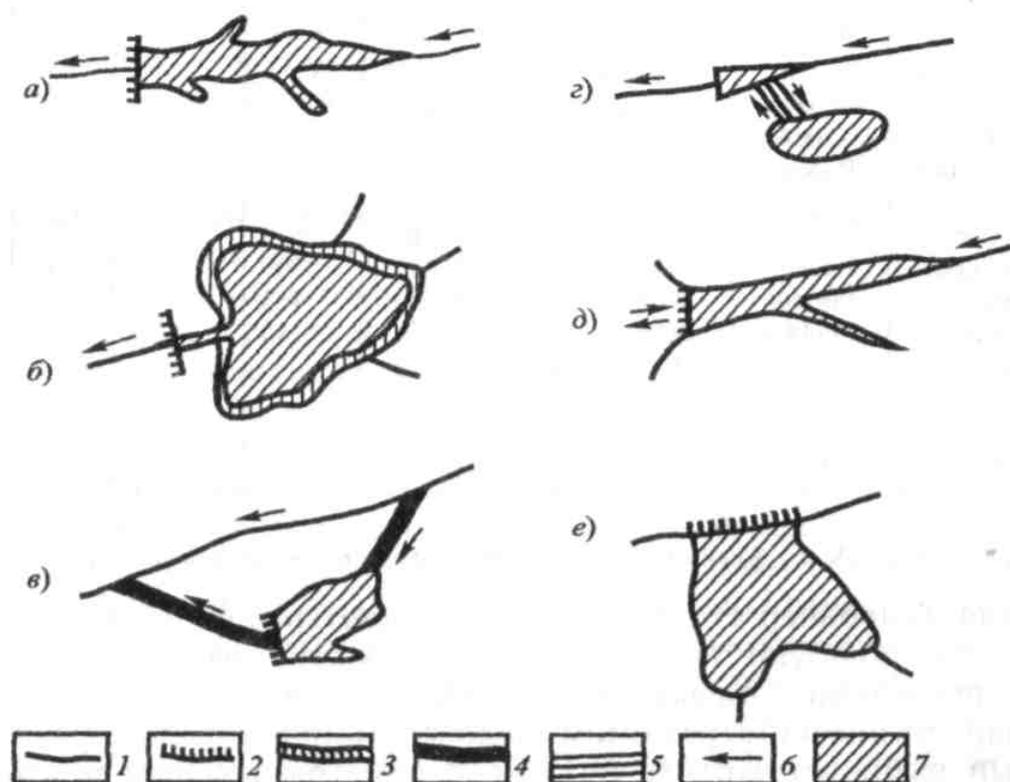


Рис. 5.1. Основные типы водохранилищ:

- а – долинное запрудное; б – котловинное запрудное (подпруженное озеро);  
в – котловинное наливное; г – котловинное наливное при гидроаккумулирующей электростанции; д – долинное запрудное в эстуарии при приливной электростанции; е – котловинное запрудное в опресненном морском заливе;  
1 – река; 2 – плотина; 3 – затопленная при подпоре водой береговая зона озера; 4 – подводящий и отводящий каналы; 5 – водоводы;  
6 – направление течения; 7 – зеркало водохранилища

По *морфологическому строению* ложа согласно К.К. Эдельштейну [5, 11] водохранилища делятся на *долинные* и *котловинные* (или озерные). К долинным относятся водохранилища, ложем которых служит часть речной долины. Такие водохранилища возникают после сооружения на реке плотины. Главный признак таких водохранилищ – наличие уклона дна и увеличение глубин от верхней части водоема к плотине. Долинные водохранилища подразделяются, в свою очередь, на *русловые*, находящиеся в пределах русла и низкой поймы реки, и *поименно-долинные*, водой которых помимо русла затоплена также высокая пойма и иногда участки надпойменных террас. К котловинным (озерным) водохранилищам относятся подпруженные (зарегулированные) озера и водохранилища, расположенные в изолированных низинах и впадинах, в отгороженных с помощью дамб от моря заливах, лиманах, лагунах, а также в искусственных выемках (карьерах). Небольшие водохранилища площадью менее 1 км<sup>2</sup> называют *прудами*.

По *способу заполнения водой* водохранилища бывают *запрудные*, когда их наполняет вода водотока, на котором они расположены, и *наливные*, когда вода в них подается из рядом расположенного водотока или водоема. К наливным водохранилищам относятся, например, водохранилища гидроаккумулирующих электростанций.

По *географическому положению водохранилища* делят на *горные*, *предгорные*, *равнинные* и *приморские*. Первые из них сооружают на горных реках, они обычно узкие и глубокие и имеют напор, т.е. величину повышения уровня воды в реке в результате сооружения плотины до 300 м и более. В предгорных водохранилищах обычно высота напора составляет 50–100 м. Равнинные водохранилища широкие и мелкие, высота напора – не более 30 м. Приморские водохранилища с небольшим (несколько метров) напором сооружают в морских заливах, лиманах, лагунах, эстуариях.

Примерами высоконапорных горных водохранилищ являются Нурекское и Рогунское на Вахше с высотой напора около 300 м. К предгорным водохранилищам могут быть отнесены некоторые водохранилища Енисейского и Ангарского каскадов: Красноярское (высота напора 100 м), Братское (106 м), Усть-Илимское (88 м). Примерами равнинных водохранилищ могут служить водохранилища Волжского и Днепровского каскадов: Рыбинское (высота напора 18 м), Куйбышевское (29 м), Волгоградское (27 м), Каневское (15 м), Каховское (16 м). К приморским водохранилищам относятся, например, опресненная водами Дуная лагуна Сасык на западном побережье Черного моря на Украине.

Сооружение равнинных водохранилищ обычно сопровождается большим затоплением территорий – пойменных лугов, лесов, сельскохозяйственных угодий, иногда требует переноса на новое место населенных

пунктов, предприятий, дорог. При сооружении горных водохранилищ больших затоплений территории не происходит.

*По месту в речном бассейне* водохранилища могут быть подразделены на *верховые* и *низовые*. Система водохранилищ на реке называется *каскадом*.

*По степени регулирования речного стока* водохранилища могут быть *многолетнего, сезонного, недельного* и *суточного регулирования*. Характер регулирования стока определяется назначением водохранилища и соотношением полезного объема водохранилища и величины стока воды реки.

### 5.1.2. Типы озер

Озера подразделяют по размеру, степени постоянства, географическому положению, происхождению котловины, характеру водообмена, структуре водного баланса, термическому режиму, минерализации вод, условиям питания водных организмов и др.

*По размеру* озера подразделяют на очень большие – площадью свыше 1000 км<sup>2</sup>, большие – площадью от 101 до 1000 км<sup>2</sup>, средние – площадью от 10 до 100 км<sup>2</sup> и малые – площадью менее 10 км<sup>2</sup>.

*По степени постоянства* озера делят на постоянные и временные (эфемерные). К последним относятся водоемы, которые заполняются водой лишь во влажные периоды года, а в остальное время пересыхают, а также некоторые термокарстовые озера, теряющие воду в летний период.

*По географическому положению* озера подразделяют на интразональные, которые находятся в той же географической (ландшафтной) зоне, что и водосбор озера, и полизональные, водосбор которых расположен в нескольких географических зонах. Малые озера на равнинах, как правило, интразональны, крупные озера обычно полизональны. Полизональны и горные озера, водосбор которых расположен в нескольких высотных ландшафтных зонах.

*По происхождению* озерные котловины могут быть тектонические, вулканические, метеоритные, ледниковые, карстовые, термокарстовые, суффозионные, речные, морские, эоловые, органогенные [5, 11, 17]. Такое же название дают и озерам, находящимся в этих котловинах.

*Тектонические котловины* располагаются в крупных тектонических прогибах на равнинах (озера Ладожское, Онежское, Ильмень, Верхнее и др.), в крупных тектонических предгорных впадинах (оз. Балхаш), в местах крупных тектонических трещин – рифтов, сбросов, грабенов (озера Байкал, Танганьика, Ньяса и др.). Сложную, но безусловно тектоническую природу имеет впадина, где расположено Каспийское море.

*Вулканические котловины* расположены либо в кратерах потухших вулканов (некоторые озера в Италии, на о. Ява, в Японии и т.д.), либо

образовались вследствие подпруживания рек продуктами вулканизма – лавой, обломками породы, пеплом (оз. Кроноцкое на Камчатке).

*Метеоритные котловины* возникли в при падения метеоритов (оз. Каали в Эстонии).

*Ледниковые котловины* образовались в результате деятельности современных или древних ледников. Ледниковые озерные котловины подразделяют на *троговые*, связанные с «выпахивающей» работой ледников (оз. Женевское, многие озера в Скандинавии, в Карелии, на Кольском полуострове); *каровые*, расположенные в *карах* (горные озера в Альпах, на Кавказе); *моренные*, сформировавшиеся среди *моренных* отложений. Троговые и каровые котловины созданы эрозионной, моренные – аккумулятивной деятельностью ледников. К ледниковым озерам относятся также специфические озера (часто временные), образовавшиеся в результате подпруживания рек ледником или возникающие на теле самого ледника. Ледниковые озера, возникшие в результате моренноаккумулятивной деятельности ледника или в результате подпруживания рек самим ледником, можно назвать приледниковыми, а возникшие на теле ледника – надледниковыми.

*Карстовые котловины* образуются в районах залегания известняков, доломитов и гипсов в результате химического растворения этих пород поверхностными и в особенности подземными водами. Образующиеся в районах карстовых просадок или в карстовых пустотах и пещерах озера могут быть, таким образом, как поверхностными, так и подземными. Таких озер много на Урале, Кавказе и в Крыму.

*Термокарстовые котловины* образуются в районах распространения многолетнемерзлых грунтов в результате их протаивания и сопутствующей просадки грунта (небольшие озера в тундре и тайге).

*Суффозионные котловины* возникают в результате просадок, вызванных вымыванием подземными водами из грунта мелких частиц и цементирующих веществ (такие озера характерны для степных и лесостепных районов, например в Западной Сибири).

*Котловины речного происхождения* связаны с эрозионной и аккумулятивной деятельностью рек. Это разнообразные по генезису пойменные водоемы (старицы, промоины, небольшие озера), дельтовые и придельтовые водоемы, плесы пересыхающих рек и др.

На реках возникают и так называемые *долинные котловины*, образующиеся либо в результате горных обвалов (завальные котловины), либо в результате подпруживания рек *конусами выноса* боковых притоков (часто в результате селевых паводков).

*Котловины морского происхождения* связаны либо с подпорным влиянием моря (лиманы, образовавшиеся в результате затопления речных

долин после повышения уровня моря), либо с отчленением от берега аккумулятивными косами и барами небольших морских акваторий (лагуны).

*Эоловые котловины* образуются в понижениях между песчаными дюнами и превращаются в озера в результате затопления их речными или морскими водами. Эоловые озера встречаются вблизи морских берегов, в дельтах рек (например, Волги, Или, Дуная). Органогенные котловины формируются в болотах, а возникающие при этом водоемы называют болотными озерами и озерками.

*По характеру водообмена* озера подразделяют на сточные и бессточные. Первые из них сбрасывают, по крайней мере, часть поступающего в них речного стока вниз по течению (примером могут служить такие озера, как Байкал, Онежское, Ладожское). Частным случаем сточных озер являются проточные озера, через которые осуществляется транзитный сток реки; к таким водоемам относятся озера Чудское с Псковским (р. Великая). Бессточными считают озера, которые, получая сток, не расходуют его лишь на испарение, инфильтрацию или искусственный водозабор, не отдавая ничего в естественный или искусственный водоток (примерами могут служить Каспийское и Аральское моря, озера Иссык-Куль, Балхаш). Каспийское и Аральское моря, согласно определению, с научной точки зрения должны считаться именно бессточными озерами (связи с океаном в современную геологическую эпоху они не имеют). Но благодаря их большим размерам и режиму, сходному с морским, эти водоемы условно называют морями.

Структура водного баланса озер, классификация по термическому режиму, минерализации и условиям питания водных организмов рассмотрены ниже.

## 5.2. Основные морфометрические характеристики водоемов

Для морфологических и морфометрических характеристик водохранилищ и озер применимы одни и те же показатели. Из морфометрических характеристик водоемов наиболее важны *площадь его поверхности  $F$*  и *объем  $V$* . Форма водохранилища определяется характером заполненного водой понижения. Котловинные водохранилища обычно имеют озеровидную форму, долинные – вытянутую. Многие долинные водохранилища расширяются по направлению к плотине, имеют изрезанные берега и многочисленные заливы (затопленные устья притоков). Форма водохранилища изменяется с изменением уровня воды.

Во всех озерах более или менее четко выделяют основные морфологические элементы: *котловину*, т.е. естественное понижение земной поверхности самого различного происхождения, в пределах которого и располо-

жено озеро; *ложе* (или *чашу*) озера, непосредственно занятое водой (рис. 5.2, а).

Важным элементом озерной котловины является береговая область (рис. 5.2, б), которая при абразионном характере берега включает береговой уступ, побережье и береговую отмель. Последние два элемента озерной котловины часто называют *литоралью*, к характерным чертам которой относятся мелководность и воздействие волнения. За пределами литорали находится подводный откос (или *сублитораль*). Глубоководная часть озера – это *пелагиаль*; дно озера называют *профундалью*.

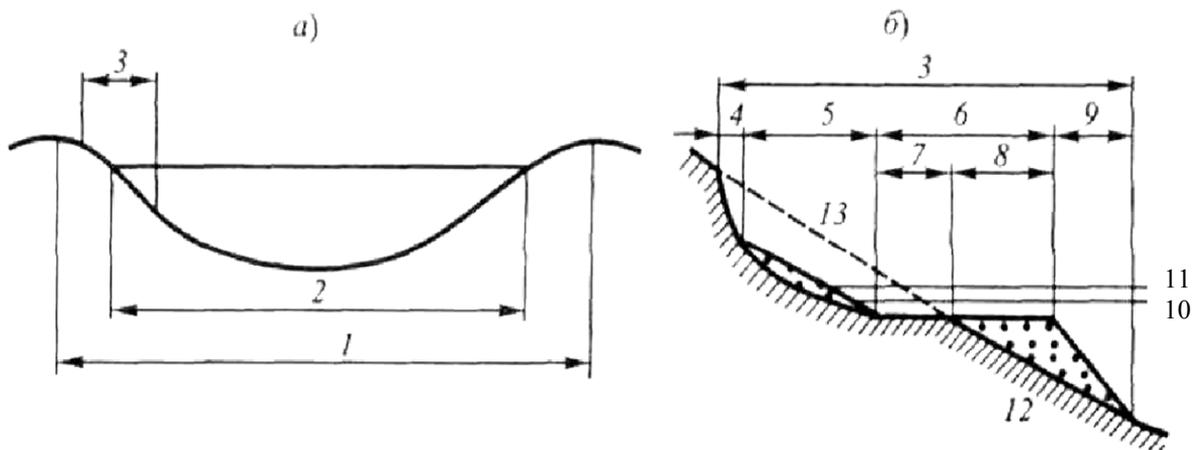


Рис. 5.2. Схема озерной котловины (а) и ее береговой области (б):  
 1 – котловина; 2 – ложе (чаша); 3 – береговая область; 4 – береговой уступ;  
 5 – побережье; 6 – береговая отмель; 7, 8 – абразионная и аккумулятивная  
 части береговой отмели; 9 – подводный откос; 10, 11 – низший и высший  
 уровни воды; 12 – коренные породы; 13 – начальный профиль берега

Развитие высшей растительности (макрофитов), как правило, ограничено литоралью.

В пределах озера выделяют также такие морфологические элементы, как плесы, заливы, бухты.

Основными морфометрическими характеристиками озера служат (рис. 5.3): площадь озера  $F_{оз}$ ; объем воды в озере  $V_{оз}$ ; длина береговой линии  $L_{бер.л}$ , проведенной по урезу воды; длина озера  $L_{оз}$  – кратчайшее расстояние по поверхности воды вдоль оси озера между наиболее удаленными точками береговой линии; ширина озера  $B_{оз}$  – расстояние между противоположными берегами озера, измеренное по линии, перпендикулярной оси озера в любой его части.

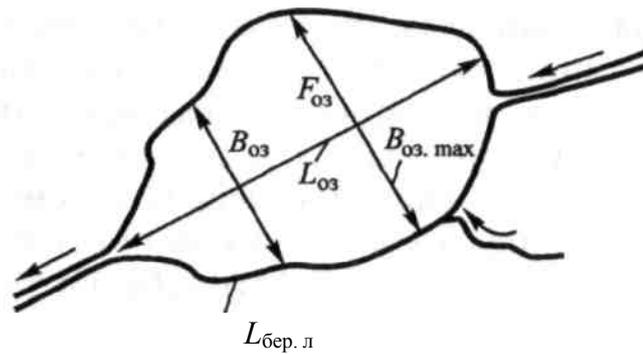


Рис. 5.3. Морфометрические характеристики озера

Наибольшее значение последней величины называют максимальной шириной озера  $B_{оз. max}$ . Среднюю ширину озера вычисляют по формуле

$$B = F_{оз} / L_{макс}. \quad (5.1)$$

Важными морфометрическими характеристиками озера являются его глубина  $h_{оз}$  (в разных частях озера она различна), максимальная глубина  $h_{оз. max}$ , средняя глубина  $h_{оз. ср}$ , определяемая по формуле

$$h_{оз. ср} = V_{оз} / F_{оз}. \quad (5.2)$$

Все перечисленные выше морфометрические характеристики озера зависят от высоты стояния уровня воды в нем или от выбранного в толще воды отсчетного горизонта (или глубины). Наиболее важно знать, как изменяются с изменением уровня (или глубины) такие характеристики, как площадь озера, объем воды в нем, средняя и максимальная глубина.

### 5.3. Водный баланс водоемов

Составляющими приходной части уравнения водного баланса любого озера служат атмосферные осадки  $x$ , поверхностный приток  $u_{повр}$ , конденсация водяного пара на поверхность озера  $z_{конд}$ , подземный приток  $w_{пр}$ . Поверхностный приток может быть как естественным (речной сток  $u_{пр}$ ), так и антропогенным (сброс отработанных вод, например возвратных вод орошения, а также промышленных и коммунальных сточных вод,  $u_{сбр}$ ).

Составляющие расходной части уравнения водного баланса сточного озера – это поверхностный отток из озера  $u_{пов. ст}$ , подземный отток (фильтрация) из озера  $w_{ст}$ , испарение с поверхности озера  $z_{исп}$ . Поверхностный отток складывается из стока вытекающей из озера реки и искусственного водозабора на хозяйственные нужды  $u_{вдзб}$  (на орошение, водоснабжение и т.д.). Изменение запасов воды в озере обозначается через  $\pm \Delta u$ .

Исходя из общего уравнения водного баланса любого водного объекта и учитывая принятые обозначения, уравнение водного баланса сточного озера принимает вид:

$$x + y_{\text{пр}} + y_{\text{сбр}} + z_{\text{конд}} + w_{\text{пр}} = y_{\text{ст}} + y_{\text{вдзб}} + z_{\text{исп}} + w_{\text{ст}} \pm \Delta u. \quad (5.3)$$

Для бессточного озера уравнение водного баланса будет таким же, но только без члена  $y_{\text{ст}}$  в расходной части.

Как и для других водных объектов, члены данного уравнения относятся к некоторому интервалу времени  $\Delta t$  (месяц, год, в среднем за несколько лет и т.д.) и выражают либо в величинах слоя (м, см, мм), либо в объемных единицах ( $\text{км}^3$ ,  $\text{м}^3$ ).

При представлении членов уравнения в объемных единицах используют заглавные буквы и изменение запасов воды в озере ( $\pm \Delta U$ ) понимают как изменение объема воды в озере ( $\pm \Delta V$ ) за интервал времени  $\Delta t$ .

Если же члены уравнения заданы в величинах слоя, то  $\pm \Delta u$  – это не что иное, как изменение уровня воды в озере (т.е.  $\pm \Delta H$ ) за тот же интервал времени  $\Delta t$ .

Для озер изменения уровня (а также слоев стока, осадков, испарения) обычно задают в сантиметрах. Тогда пересчет изменения объема озера  $\Delta V$  в изменение его уровня осуществляют по формуле

$$\Delta H = k_2 \Delta V / F, \quad (5.4)$$

где  $\Delta H$  – в см;  $\Delta V$  – в  $\text{км}^3$   $F$  – в  $\text{км}^2$  и  $k_2 = 105$ .

Когда сумма приходных членов уравнения превышает сумму расходных, то  $\Delta u > 0$ , и объем вод в озере увеличивается ( $\Delta V > 0$ ), а его уровень повышается; когда же приходная часть уравнения меньше расходной, то  $\Delta u < 0$ , и объем вод в озере уменьшается ( $\Delta V < 0$ ), а уровень воды в нем понижается ( $\Delta H < 0$ ). При анализе водного баланса бессточных озер нередко используют понятие *уровень равновесия* или *уровень тяготения*. Это тот уровень, при котором приходные составляющие водного баланса бессточного озера равны расходным. При уменьшении, например, речного стока, поступающего к бессточному озеру, сразу же изменяется уровень равновесия. Уровень в озере начинает снижаться, приближая водный баланс водоема к равновесному состоянию. Поскольку все составляющие водного баланса постоянно изменяются, уровень равновесия практически никогда не достигается.

Соотношение между различными приходными и расходными составляющими уравнения водного баланса называют *структурой водного баланса*. Для характеристики структуры приходной и расходной частей уравнения водного баланса водоема учитывают долю осадков и испарения в обеих частях уравнения.

По соотношению составляющих расходной части уравнения водного баланса все озера, согласно Б.Б. Богословскому, подразделяются на две группы: *стоковые* (С) и *испаряющие* (И). У озер первой группы сток превышает испарение с поверхности:  $Y_{ст} > Z_{оз}$ , у озер второй группы  $Y_{ст} < Z_{оз}$ . По соотношению составляющих приходной части уравнения водного баланса озера обеих групп подразделяют на три типа: *приточные* (П), когда приток с водосбора преобладает над осадками ( $Y_{пр} > X_{оз}$ ), *нейтральные* (Н), когда  $Y_{пр} \sim X_{оз}$ , и *дождевые* (Д), если осадки преобладают над притоком ( $Y_{пр} < X_{оз}$ ).

Стоковые озера характерны для зон достаточного и избыточного увлажнения, испаряющие – для зон недостаточного увлажнения.

Водный баланс водохранилищ, так же, как и водный баланс озер, может быть охарактеризован уравнением (5.3); которое для многолетнего периода приобретет вид:

$$X_{оз} + Y_{пр} = Y_{ст} + Z_{оз}. \quad (5.5)$$

Характерная черта структуры водного баланса водохранилищ – преобладание притока речных вод в приходной и преобладание стока вод в расходной части уравнения водного баланса. На долю осадков в большинстве случаев приходится лишь 2–3 % прихода вод, на долю испарения – обычно не более 10 % расхода вод. Основная причина этого – весьма большие значения величины удельного водосбора  $\phi$  для большинства водохранилищ.

Для водохранилищ, расположенных в условиях избыточного и достаточного увлажнения,  $Y_{пр} < Y_{ст}$ , т.е. ниже водохранилища происходит некоторое увеличение речного стока. Наоборот, в условиях недостаточного увлажнения  $Y_{пр} > Y_{ст}$ , при этом в водохранилищах теряется часть стока, тем больше, чем больше величина  $(z_{вдхр} - x_{вдхр})$  и площадь водохранилища.

Интенсивность водообмена для водохранилищ обычно больше, чем для озер. Поскольку роль местных осадков и испарения в водном балансе большинства водохранилищ невелика, значения коэффициента условного водообмена для водохранилищ обычно значительно больше, чем для озер, что объясняется меньшими объемами искусственных водоемов.

## 5.4. Термический режим водоемов

### 5.4.1. Термический режим озер

Классификация озер по термическому режиму предложена в XIX в. швейцарским озероведом Ф.А. Форелем. В основу классификации положены типы термической классификации в водоемах.

Увеличение температуры воды от дна к поверхности называется *прямой температурной стратификацией*; уменьшение температуры от дна к поверхности носит название *обратной температурной стратификации*; равномерное распределение температуры по глубине называется *гомотермией*.

Форель подразделил все пресноводные водоемы мира на три группы: 1) *полярные* (или холодные) с температурой в течение всего года ниже  $4^{\circ}\text{C}$  и с преобладанием обратной температурной стратификации; 2) *тропические* (или теплые) с температурой в течение всего года выше  $4^{\circ}\text{C}$  и с преобладанием прямой температурной стратификации; 3) *озера в условиях умеренного климата* с температурой выше  $4^{\circ}\text{C}$  и прямой температурной стратификацией летом и температурой ниже  $4^{\circ}\text{C}$  и обратной температурной стратификацией зимой (рис. 5.4).

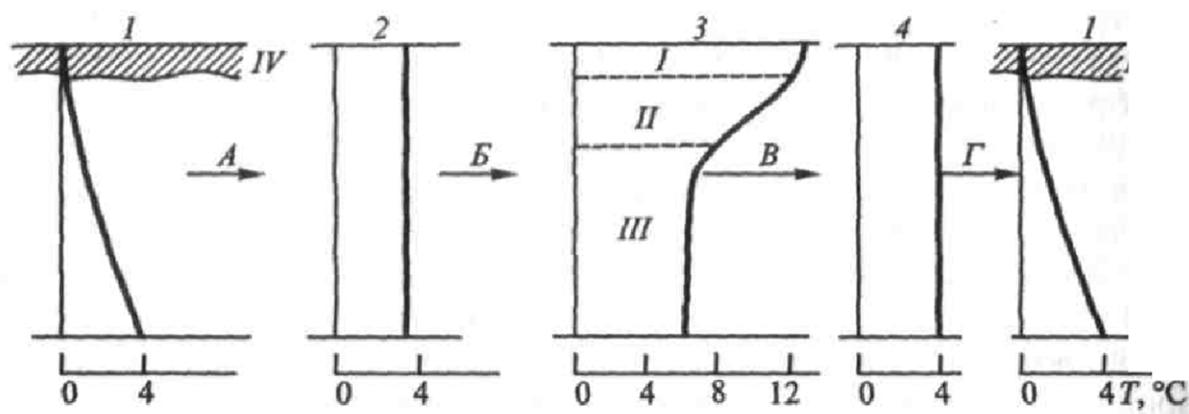


Рис. 5.4. Схема температурной стратификации в озерах умеренного климата: 1 – обратная температурная стратификация зимой; 2 – весенняя гомотермия; 3 – прямая температурная стратификация летом; 4 – осенняя гомотермия; А – весеннее нагревание; Б – летнее нагревание; В – осеннее охлаждение; Г – предзимнее и зимнее охлаждение; I – эпилимнион, II – металимнион, III – гипolimнион, IV – ледяной покров

Формирование как прямой, так и обратной температурной стратификации, а тем более трансформация прямой стратификации в обратную и наоборот сопровождается *вертикальной циркуляцией вод в озере*, т.е. вертикальным перемешиванием.

В режиме температуры воды в озере выделяют четыре сезона (периода): весеннего нагревания, летнего нагревания, осеннего охлаждения, зимнего охлаждения.

Зимой подо льдом в озере наблюдается обратная температурная стратификация (рис. 5.4, в, 1). В поверхностном слое температура близка к  $0^{\circ}\text{C}$ , в придонном слое – около  $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$  (в более мелких водоемах у дна температура немного ниже).

В период весеннего нагревания температура воды в поверхностном слое повышается. Этот процесс начинается, когда озеро еще покрыто

льдом, и продолжается после схода ледяного покрова. Когда температура поверхностного слоя станет несколько выше температуры нижерасположенных слоев, нарушится вертикальная плотностная устойчивость вод: более теплая и более плотная вода начинает опускаться, а менее теплая и менее плотная — подниматься к поверхности. Возникшее интенсивное вертикальное конвективное перемешивание приводит к выравниванию температуры по вертикали (рис. 5.4, в, 2), наступает весенняя гомотермия (обычно при температуре от 2 до 4 °С). В это время создаются благоприятные предпосылки и для вертикального динамического ветрового перемешивания. Вода в толще озера может обновляться.

В период летнего нагревания в озере устанавливается прямая температурная стратификация (рис. 5.4, в, 3). Наиболее высокую температуру приобретает поверхностный слой воды — *эпилимнион*. Ниже этого слоя лежит так называемый слой температурного скачка — *металимнион*. Основная же толща озерных вод сохраняет относительно невысокую температуру. Этот слой называется *гиполимнион*. В эпилимнионе температура воды может повышаться до 20–25 °С, в гиполимнионе температура может сохраняться равной 5–6 °С. Таким образом, в слое скачка температура может резко изменяться на величину до 20 °С (при этом вертикальные градиенты температуры иногда достигают 8–10 °С на 1 м). В период осеннего охлаждения температура в поверхностном слое понижается. После того как она станет несколько ниже температуры нижерасположенных слоев, более плотные воды начинают опускаться вниз, возникает активное конвективное перемешивание. В результате устанавливается *осенняя гомотермия*. Как и во время весенней гомотермии, создаются благоприятные условия и для вертикального динамического перемешивания. Вода в придонных слоях обновляется. Гомотермия обычно устанавливается при температуре около 4 °С, а иногда (при сильном ветровом воздействии на поверхность озера) и при несколько большей температуре (5–6 °С и выше).

Наконец, наступает период предзимнего и зимнего охлаждения. В это время температура в поверхностном слое постепенно понижается до температуры замерзания (0 °С для пресных вод), в толще воды устанавливается обратная температурная стратификация, а на поверхности озера образуется ледяной покров. Температура в придонных слоях снижается до 4, а иногда и до 2–3 °С, а в очень мелководных озерах — и до 0,5–1 °С.

Но вода на глубинах озера не достигает 0 °С и не замерзает, что предохраняет живые организмы от гибели.

Термический режим озер с повышенной минерализацией воды существенно отличается от термического режима пресноводных озер. Летом сильно минерализованные воды могут нагреваться до 50–70 °С. Зимой такая вода в поверхностном слое, не замерзая, охлаждается до зна-

чительной отрицательной температуры. У дна же может сохраниться в течение всего года положительная, иногда заметно повышенная температура воды. Термический режим озер с солоноватой или соленой водой (водой морской солености) имеет много общего с термическим режимом морей.

#### 5.4.2. Термический режим водохранилищ

Термический режим водохранилищ отличается от термического режима рек неоднородностью распределения температуры воды по длине, ширине и глубине. Термический режим крупных и глубоких водохранилищ сходен с аналогичным режимом озер, однако отличается от него более нестабильным характером. Наиболее типичен «озерный» тип термического режима для слабопроточных участков водохранилищ, где обычно наблюдается температурная стратификация.

Своеобразен термический режим водохранилищ, специально используемых для охлаждения вод, сбрасываемых с тепловых и атомных электростанций. В таких водоемах-охладителях температура воды может повышаться заметно выше значений, характерных для естественного хода термических процессов.

Период ледовых явлений на водохранилищах, как и в озерах, обычно продолжительнее, чем на реках в тех же географических условиях. Толщина льда на водохранилищах также больше, чем на реках. Если водохранилище осуществляет недельное или суточное регулирование стока, то частые колебания уровня удлиняют период замерзания. Во время зимней сработки водохранилищ с сезонным и многолетним регулированием большие объемы льда оседают на берегах.

### 5.5. Ледовые явления на озерах

По характеру ледового режима в зависимости от климатических условий озера подразделяются на четыре группы: не имеющие ледовых явлений, с неустойчивым ледоставом, с устойчивым ледоставом зимой, с ледоставом в течение всего года (например, подледные озера в Антарктиде).

У озер третьей группы, находящихся в основном в условиях умеренного климата, так же, как и у рек, выделяют три характерных периода ледового режима: замерзания (осенних ледовых явлений), ледостава, вскрытия (весенних ледовых явлений).

Ледовые явления начинаются после того, как температура поверхностного слоя достигнет точки замерзания ( $0^{\circ}\text{C}$  для пресноводных озер). Этот момент, в свою очередь, наступает несколько позже перехода средней суточной температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$ . Ледостав устанавливается позже начала ледовых явлений. В той же последовательности наступают харак-

терные моменты ледового режима в весенний период: сначала средняя суточная температура воздуха переходит через 0°C, затем начинает повышаться температура воды в полыньях и закраинах и, наконец, с некоторым запозданием озеро освобождается от льда.

Осенние ледовые явления начинаются в наиболее быстро охлаждающихся прибрежных районах озера. На отмелях у берегов возникают забереги. На крупных озерах эти ледяные образования (как и на морях) называют *припаем*.

Озерный лед обычно имеет слоистое строение. Непосредственно на поверхности воды лежит прозрачный водный кристаллический лед, на котором в случае выхода воды по трещинам образуется малопрозрачный водно-снеговой лед (*наслуз*) из пропитанного водой снега. При подтаивании и последующем смерзании лежащего на льду снега формируется снеговой лед.

Толщина льда на озерах северо-запада европейской части России достигает 50–60 см, на озерах севера Сибири – 2–3 м.

Таяние и разрушение льда на озерах происходит под воздействием солнечной радиации, теплообмена льда с атмосферой и с нагревающейся водой самого озера, теплоты, поступающей с талыми снеговыми, дождевыми и речными водами. В ряде случаев заметное влияние оказывают и механические факторы – течения, волнение, ветер. Чаще всего лед на озерах тает на месте, причем лед стаивает как с верхней, так и с нижней своей поверхности. Раньше всего лед тает вблизи берегов, уже освободившихся от снежного покрова и поэтому быстрее нагревающихся. Участки чистой воды у берегов, так же, как и на реках, называют закраинами. Часть льда может быть вынесена из озера вытекающей из него рекой. Поскольку лед сходит на озерах позже, чем на реках, на вытекающей из озера реке могут наблюдаться два ледохода: «речной» и «озерный» (р. Нева).

## 5.6. Динамика уровня воды в водохранилищах и озерах

*Колебания уровня воды в водохранилищах* в основном являются следствием искусственно регулируемого процесса наполнения и сработки водохранилища и могут быть оценены с помощью полного уравнения водного баланса водоема.

В период наполнения, обычно во время половодья и паводка на реке, уровень воды в водохранилище может подняться на значительную величину (иногда от уровня мертвого объема до нормального подпорного уровня). На такую же величину уровень снижается в период сработки водохранилища. В равнинных водохранилищах величина сезонных колебаний уровня составляет обычно 5–7 м, на горных – 50–80 м, т.е. она зна-

чительно больше, чем на озерах. Велика на водохранилищах и интенсивность сезонных повышений и понижений уровня воды. Существенно меньшие по величине колебания уровня сопутствуют недельному и суточному режимам наполнения и сработки водохранилищ. Наибольшие колебания уровня свойственны нижней зоне водохранилища, в зоне переменного подпора изменения уровня сходны с речными.

Так же, как и на озерах, на водохранилищах (особенно на мелководьях) довольно обычны сгонно-нагонные колебания уровня. Для долинных водохранилищ наиболее значительные сгонно-нагонные колебания уровня наблюдаются в тех случаях, когда ветер дует вдоль водохранилища.

*Колебания уровня воды в озерах* во многом определяют и возможности хозяйственного использования водоемов, так как от высоты стояния уровня зависит эффективность работы водного транспорта, надежность водозабора на орошение, промышленное и коммунальное водоснабжение и т.д.

Колебания уровня воды в озерах по причинам, вызывающим их, могут быть подразделены на две группы: 1) колебания уровня, связанные с изменением объема (массы) воды в озере и определяемые в основном изменениями составляющих водного баланса водоема (такие колебания уровня иногда называют *объемными* или *водно-балансовыми*) и 2) колебания уровня, не связанные с изменениями объема вод в озере, а определяющиеся перераспределением неизменного объема по пространству озера (такие колебания уровня часто называют *деформационными*).

Колебания уровня первой группы связаны прежде всего с климатическими причинами и, в частности, с обусловленными климатом изменениями приходных составляющих водного баланса (притока речных вод, осадков на поверхность озера). Поскольку речной сток и увлажнение территории в целом подвержены климатически обусловленным вековым, многолетним и сезонным колебаниям, аналогичные колебания имеет и уровень воды в озерах. В последние 40–50 лет в связи с антропогенными изменениями стока рек в объемных колебаниях уровня озер заметное влияние приобрел и антропогенный фактор.

Колебания уровня второй группы связаны прежде всего с так называемыми *сгонно-нагонными денивеляциями уровня*, обусловленными ветром. Такие колебания имеют кратковременный характер.

*Вековые и многолетние колебания уровня озер.* Вековые и многолетние колебания уровня озер – наиболее яркое проявление гидрологического режима водоемов; они же оказывают и наиболее сильное (нередко неблагоприятное) воздействие на хозяйственное использование озер и сопредельных территорий. Основная причина таких колебаний – климатическая, поэтому изучение вековых и многолетних колебаний уровня озер

может служить и косвенным доказательством существования климатических изменений увлажненности территорий.

Вековые и многолетние колебания уровня наиболее заметны у бессточных озер, находящихся в аридных районах (Каспийское и Аральское моря, оз. Балхаш и др.). Объясняется это тем, что при изменении степени увлажненности больших территорий приток речных вод к озеру и потери с его поверхности на испарение изменяются почти в противофазе: в засушливые периоды в озеро поступает мало стока, а потери на испарение наибольшие, во влажные периоды поступление стока и осадков на поверхность озер увеличивается, а потери на испарение несколько уменьшаются.

*Сезонные колебания уровня озер.* Эти колебания уровня также в основном связаны с изменениями составляющих водного баланса озер. Повышение уровня озер происходит в периоды повышенного притока вод в озера, определяемые типом внутригодового режима речного стока. Величина таких колебаний уровня озер зависит от площади поверхности озера и удельного водосбора  $\phi$ : с уменьшением площади озера и возрастом  $\phi$  она увеличивается.

*Кратковременные колебания уровня озер.* Колебания уровня этого вида могут быть обусловлены сгонно-нагонными явлениями, *сейшмами*, колебаниями атмосферного давления.

Воздействие ветра вызывает повышение уровня воды у наветренного (нагон) и понижение уровня воды у подветренного (сгон) берега.

## 5.7. Движение воды в озерах и водохранилищах

### 5.7.1. Течения в озерах

Основными причинами течений в озерах являются ветер, сток рек, впадающих в озеро, неравномерное распределение температуры и минерализации воды, а также атмосферного давления.

Ветер вызывает *ветровые течения* (рис. 5.5). Установившееся ветровое течение называют *дрейфовым течением*.

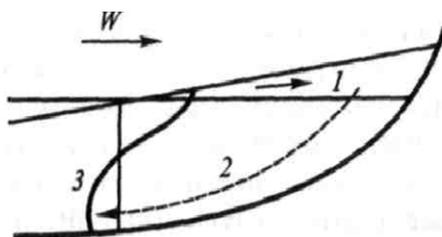


Рис. 5.5. Схема возникновения ветрового (1) и компенсационного (2) течений в озере и вертикальное распределение скорости течения (3)

В отличие от морей в озерах, особенно небольших, заметного поворота поверхностных течений под действием силы Кориолиса обычно не происходит, и в большинстве случаев направление поверхностного течения совпадает с направлением ветра. Между скоростью ветра  $W$  (м/с) и скоростью ветрового течения в поверхностном слое  $v$  (м/с) может быть найдена зависимость вида  $v = KW$ , где ветровой коэффициент  $K$  для озер обычно составляет 0,01–0,02. Ветровые течения в озерах достигают 0,5 м/с.

Ветер вызывает также *сгонно-нагонные денивеляции уровня*: возникающие перекосы уровня создают так называемые *компенсационные течения*, развивающиеся ниже слоя воды, охваченного ветровым течением, и противоположно ему направленные.

После прекращения ветра на многих озерах возникают сейши, сопровождающиеся *сейшевыми течениями*. Скорости таких течений обычно невелики, но в узких заливах и проливах могут достигать 1 м/с и более.

Ветер создает также *волновые течения*, совпадающие с направлением распространения волн.

Втекающие в озера реки создают местные перекосы уровня воды, приводящие к возникновению *гравитационных (стоковых) течений*, иногда распространяющихся на все озеро, особенно если оно невелико по размеру и проточное. Скорости стоковых течений зависят от скоростей течения во впадающей в озеро реке и могут достигать в непосредственной близости от устья реки 1–2 м/с. Своеобразные стоковые течения возникают и вблизи истока вытекающей из озера реки.

Неравномерное распределение по пространству озера температуры, а иногда и минерализации воды создает горизонтальные градиенты плотности и перекосы уровня, вызывающие *плотностные течения*. В период нагревания озера температура воды вблизи берегов выше, чем в середине озера. Такое распределение температуры воды приводит к тепловому расширению воды и подъему уровня в прибрежной зоне и создает плотностную горизонтальную циркуляцию, направленную в больших глубоких озерах в Северном полушарии под влиянием силы Кориолиса против часовой стрелки. В период охлаждения, когда у берегов температура воды ниже, чем в середине озера, возникает перекося уровня в сторону берега, что создает плотностную горизонтальную циркуляцию, направленную по часовой стрелке. Изменения уровня, обусловленные изменениями атмосферного давления, вызывают *бароградиентные течения*, сходные с компенсационными течениями, связанными с ветровыми изменениями уровня.

### 5.7.2. Волнение на озерах

Волнение на озерах, особенно небольших, имеет особенности, связанные с ограниченностью размеров водоема и, как правило, небольшими глубинами.

Волнение на озерах в связи с их небольшими размерами развивается быстрее, чем на больших морских акваториях. Также быстро волнение на озерах и затухает после ослабления и прекращения действия ветра. *Волны зыби*, перемещающиеся в водоемах после прекращения действия ветра, на небольших озерах наблюдаются редко.

Волнение на озерах обычно менее упорядоченное, чем на морях. Волны, как правило, трехмерные (хорошо выраженный фронт волны отсутствует), более крутые, чем на морях. *Крутизна волны* – это отношение высоты волны  $h_v$  к ее длине  $\lambda$ .

На крупных озерах максимальная высота волн может достигать 3–4, иногда 5–6 м (оз. Мичиган, оз. Ладожское). На малых озерах высота волн обычно не превышает 0,5 м. Крутизна волн (отношение высоты волны  $h_v$  к длине волны  $\lambda$ ) на озерах в среднем около 0,1.

Параметры волн на озерах (высота  $h_v$  и длина  $\lambda$ ) зависят от скорости ветра  $W$  и длины разгона волн  $D$ .

Для определения параметров волн на озерах разработаны специальные *номограммы*, позволяющие рассчитывать  $h_v$ ,  $\lambda$ ,  $\tau$  по данным о скорости ветра  $W$  и времени его действия  $t$ , длине разгона  $D$  и глубине  $h$ .

*Перемешивание воды в озерах.* Физическими причинами вертикального перемешивания вод в озерах являются различия в плотности воды, вызывающие *конвективное перемешивание*, и действие ветра (волнение, ветровые течения), приводящие к *динамическому перемешиванию*.

Конвективное перемешивание наблюдается в озерах с пресной или солоноватой водой при нарушении плотностной устойчивости вод, вызванной, например, весенним нагреванием или осенним охлаждением поверхностного слоя воды до температуры наибольшей плотности. Вертикальная плотностная стратификация в озерах препятствует динамическому перемешиванию.

### 5.7.3. Течения и волнения на водохранилищах

*Течения* в водохранилищах имеют много общего с течениями в озерах, но отличаются более сложной пространственной структурой и нестационарным характером. Наиболее сильные течения наблюдаются иногда в затопленных речных руслах, в заливах встречаются застойные зоны. В водохранилищах с большой площадью поверхности, как и в озерах, наблюдаются сильные ветровые течения, во многих водохранилищах – плотностные течения.

*Волнение* на водохранилищах зависит от их размера. Обычно оно слабее, чем на озерах, но сильнее, чем на реках. На больших водохранилищах высоты волн достигают 2–3 м. Важнейшие последствия ветрового волнения на водохранилищах – вертикальное перемешивание вод, особенно на мелководьях, абразия берегов (разрушение волнами и прибоем), ухудшение условий жизнедеятельности макрофитов (высших водных растений сравнительно больших размеров: кувшинка, кубышка, ряска, тростник, рдесты и др.).

## 5.8. Влияние водохранилищ на окружающую среду

Так же, как и озера, водохранилища замедляют водообмен в гидрографической сети речных бассейнов. Сооружение водохранилищ привело к увеличению объема вод суши приблизительно на 6,6 тыс. км<sup>3</sup> и замедлению водообмена приблизительно в 4–5 раз. Так, если в естественном состоянии период условного водообмена в реках земного шара составлял в среднем около 19 сут, то в результате сооружения водохранилищ он увеличился, по расчетам Г.П. Калинина и Ю.М. Матарзина, к 1960 г. – до 40 сут, к 1970 г. – до 64 сут, к 1980 г. – до 99 сут (в 5,2 раза). Наиболее сильно замедлился водообмен в речных системах Азии (в 14 раз) и Европы (в 7 раз). Для бывшего СССР водохранилища увеличили среднее время пребывания вод в речном бассейне с 22 до 89 сут, т.е. в 4 раза. После сооружения каскада водохранилищ водообмен в бассейнах рек Волги и Днепра замедлился в 7–11 раз.

Сооружение водохранилищ всегда ведет к уменьшению как стока воды вследствие дополнительных потерь на испарение с поверхности водоема, так и стока наносов, биогенных и органических веществ вследствие их накопления в водоеме.

В результате сооружения водохранилища возрастает поверхность, покрытая водой; поскольку испарение с водной поверхности всегда больше, чем с поверхности суши, потери на испарение также возрастают. Общее уменьшение стока реки по сравнению с естественными условиями (до сооружения водохранилища) может быть оценено с помощью уравнения

$$\Delta W = (z_{\text{в}} - z_{\text{с}}) \cdot (F_{\text{вдхр}} - F_{\text{р}}), \quad (5.6)$$

где  $\Delta W$  – величина уменьшения годового объема стока, км<sup>3</sup>;

$z_{\text{в}}$  и  $z_{\text{с}}$  – годовое испарение с водной поверхности и суши, мм;

$F_{\text{вдхр}}$  и  $F_{\text{р}}$  – площади водохранилища и поверхности реки на месте искусственного водоема до его создания, км<sup>2</sup>.

В условиях избыточного увлажнения испарение с водной поверхности ненамного превышает испарение с поверхности суши. Поэтому при

избыточном увлажнении сооружение водохранилищ практически не сказывается на уменьшении стока рек.

Все водохранилища мира, по данным государственного гидрологического института (ГГИ), в 1980 г. потеряли на испарение  $120 \text{ км}^3$  воды, т.е. около 3 % стока рек мира. В то же время водохранилища служат мощными поглотителями биогенных и загрязняющих веществ благодаря процессам деструкции, осаждения и *биоседиментации*. Однако, по мнению К.К. Эдельштейна (1998), это положительное воздействие водохранилищ на качество воды может быть реализовано лишь при правильном режиме эксплуатации водохранилища, при условии ограничения антропогенной нагрузки на качество воды и принятии природоохранных мер на водосборе водоема. В некоторых случаях потребуются и реконструкция самого водохранилища.

Уменьшение стока наносов рек вследствие их отложения в водохранилищах может вызвать нарушение баланса наносов в устьях рек и стимулировать частичное волновое разрушение морского края дельты, как это уже произошло в устье Нила после возведении Высотной Асуанской плотины и создания водохранилища.

Наиболее сильное воздействие водохранилища на речной сток и природные условия долины реки ниже водохранилища связано регулирующим эффектом водохранилищ. По оценкам М.И. Львовича, сооружение водохранилищ привело к увеличению на 27 % устойчивого меженного речного стока на земном шаре. Ниже водохранилищ полностью преобразуется водный режим рек, изменяются характер заливания поймы, русловые процессы, режим устьев рек и т.д. В зоне недостаточного увлажнения воздействие водохранилищ приводит к осыханию речных пойм и дельт, что может нанести серьезный ущерб хозяйству. Осушение пойм в зоне избыточного увлажнения – явление положительное, способствующее их хозяйственному освоению, а повышенный сток ниже водохранилищ в летнюю межень – мелиорации пойм и обеспечению на них устойчивого земледелия с весны до осени.

Влияние водохранилищ на термический и ледовый режим рек в целом аналогично влиянию озер. Наиболее характерно выравнивающее воздействие водохранилищ на температуру воды в реке.

Как и озера, водохранилища оказывают заметное воздействие на природные условия сопредельных территорий. Сооружение крупных водохранилищ приводит к затоплению и подтоплению земель, повышению уровня грунтовых вод, способствующих заболачиванию земель, изменению микроклиматических условий (высушиванию внутригодовых колебаний температуры воздуха, усилению ветра, некоторому увеличению влажности воздуха и атмосферных осадков), волновому размыву берегов. Наиболее существенное негативное последствие сооружения водохрани-

лиц – это потеря земель при их затоплении. По оценкам М.И. Львовича, суммарная площадь затопления в мире равна приблизительно 240 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет 0,3 % земельных ресурсов суши. Площади затопления на территории бывшего СССР, по данным С.Л. Вендрова, порядка 80 тыс. км<sup>2</sup>.

После сооружения водохранилища изменяется почвенно-растительный покров на затопленных и подтопленных землях. Полагают, что влияние водохранилищ распространяется на сопредельную территорию, приблизительно равную по площади самому водохранилищу. Кроме того, в результате сооружения водохранилищ часто ухудшаются условия прохода на нерест многих пород рыб; нередко ухудшается качество воды вследствие возникновения в некоторые периоды года дефицита кислорода в придонных слоях, накопления солей и биогенных веществ, «цветения воды». Считают также, что сооружение водохранилищ может привести к увеличению сейсмичности района.

Таким образом, водохранилища оказывают довольно сложное и неоднозначное воздействие и на режим рек, и на природные условия сопредельных территорий. Давая несомненный положительный экономический эффект, они нередко вызывают и весьма негативные экологические последствия. Все это требует, чтобы при проектировании водохранилищ более внимательно учитывался весь комплекс гидрологических, физико-географических, социально-экономических и экологических аспектов. Возникает необходимость и в экологическом прогнозе, который невозможен без помощи гидрологии.

Важное значение при этом имеют мероприятия, осуществляемые в процессе создания и эксплуатации водохранилища с целью предотвращения нежелательных последствий и максимального использования положительного эффекта от создания водохранилищ. К таким мероприятиям относятся:

- инженерная защита от затопления территорий и объектов (населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий, предприятий, мостов и т.д.);
- переселение жителей, перенос предприятий, дорог и т.д.;
- очистка ложа водохранилища от леса и кустарников, создание водохранилищных зон;
- восстановление лесных, рыбных, охотничьих и других ресурсов;
- транспортное, рыбохозяйственное, рекреационное и другое освоение водоема;
- инженерное обустройство акватории и береговой зоны водохранилища и т.д.

## 5.9. Влияние озер на речной сток

Влияние озер на природную среду проявляется, прежде всего, через речной сток. Различают общее постоянное воздействие озер на круговорот воды в речных бассейнах и регулирующее воздействие на внутригодовой режим рек.

Основное влияние сточных водоемов суши на материковое звено круговорота воды (а также солей, наносов, теплоты и т.д.) заключается в замедлении водо-, соле- и теплообмена в гидрографической сети. Озера (как и водохранилища) представляют собой скопление вод, увеличивающее емкость гидрографической сети. В самом деле, объем воды, сосредоточенный в пресных озерах мира, – 91 тыс. км<sup>3</sup>, в то время как в реках одновременно находимся лишь 2,12 тыс. км<sup>3</sup> воды. Обновление вод в озерах происходит во много раз медленнее, чем в реках, поэтому чем больше озерность речного бассейна, тем медленнее водообмен в его гидрографической сети.

Меньшая интенсивность водообмена в речных системах, включающих озера (и водохранилища), имеет ряд серьезных последствий: накопление в водоемах солей, органических веществ, наносов, теплоты и других компонентов речного стока (в широком понимании этого термина). Реки, вытекающие из крупных озер, в основном, несут меньше солей и наносов.

Если с водной поверхности воды испаряется больше, чем величина осадков, то проточные водоемы уменьшают сток вытекающих из них рек. Кроме того, сточные озера (как и водохранилища) перераспределяют речной сток во времени, оказывая на него регулирующее воздействие и выравнивая его в течение года. Степень регулирующего воздействия озер на сток воды, солей и наносов обратно пропорциональна коэффициенту условного водообмена  $K_v$ . Чем больше объем озера по сравнению с объемом годового стока реки, вытекающей из водоема, тем меньше  $K_v$  и более равномерен сток.

Озера оказывают, таким образом, регулирующее влияние не только на сток воды, но и на сток солей, наносов, теплоты. Температура воды рек, вытекающих из глубоких озер, в период нагревания ниже, а в период охлаждения – выше, чем на незарегулированных водоемами реках в тех же природных условиях.

Помимо непосредственного влияния озер на речной сток необходимо учитывать и их воздействие на природную среду в целом. Водоемы суши оказывают заметное влияние на местные климатические условия, уменьшая континентальность климата и увеличивая продолжительность весны и осени, на внутриматериковый влагооборот (незначительно), способствуя повышению осадков, появлению туманов и т.д. Влияют водоемы и

на уровень грунтовых вод, в целом повышая его, на почвенно-растительный покров и животный мир сопредельных территорий, увеличивая разнообразие видового состава, численность, биомассу и т.д.

Озера широко используют для рыбного хозяйства, водного транспорта, водоснабжения, добычи минерального сырья, отдыха, туризма и спорта. Важно отметить необходимость комплексного и рационального использования водных и других ресурсов озер с обязательным учетом требований охраны природных (водных, земельных, рыбных и др.) ресурсов.

Проблема защиты природных ресурсов озер (особенно бессточных) неразрывно связана с рациональным использованием и охраной водных ресурсов в бассейнах рек, питающих эти озера. Это особенно хорошо видно на примере Аральского моря, судьба которого неразрывно связана с использованием водных ресурсов в бассейнах рек Амударьи и Сырдарьи. Изменение режима Аральского моря, вызванное резким сокращением стока впадающих в него рек, – наглядный пример крупномасштабного, крайне негативного воздействия хозяйственной деятельности на природу.

Приведенный пример показывает большую важность экологической и гидрологической научной экспертизы при любом крупном хозяйственном вмешательстве в природу, необходимость заблаговременного прогнозирования как естественных, так и антропогенных изменений режима рек и связанных с ними озер.

### **Вопросы для самопроверки**

1. По каким характеристикам могут быть подразделены водохранилища на типы?
2. На какие виды подразделяют озера по происхождению котловины?
3. Как называют котловины, возникающие в результате просадок, вызванных вымыванием подземными водами из грунта мелких частиц и цементирующих веществ?
4. Как возникают котловины речного происхождения?
5. Как подразделяют озера по характеру водообмена?
6. Какие озера сбрасывают, по крайней мере, часть поступающего в них речного стока вниз по течению?
7. Как называют увеличение температуры воды в водоёме от дна к поверхности?
8. Чем термический режим водохранилищ отличается от термического режима рек?
9. Что приводит к колебанию уровня воды в водохранилищах?
10. Каковы причины колебания уровня воды в озерах?
11. Что является основными причинами течений в озерах?

12. Чем обусловлено волнение на водохранилищах ? От чего зависят характеристики волн?

13. Озёра и водохранилища замедляют водообмен в гидрографической сети речных бассейнов?

14. Как влияет сооружение водохранилищ на сток воды, наносов, биогенных и органических веществ?

15. В чём состоит положительная роль русловых водохранилищ?

16. К каким отрицательным явлениям приводит сооружение крупных водохранилищ?

17. На какую сопредельную территорию распространяется влияние водохранилищ?

## 6. ГИДРОЛОГИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

### 6.1. Вода в земной коре

Воды, находящиеся в верхней части земной коры и залегающие ниже поверхности земли, называют *подземными*. Подземные воды – один из важнейших компонентов геологической среды. Наряду с гидрологией исследованием подземных вод занимается гидрогеология.

Подземные воды широко используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения, так как они, будучи защищенными от поверхностных загрязнений, обладают, как правило, более высоким качеством в сравнении с поверхностными водами, не требуют дорогостоящей очистки, лучше. Не случайно подземные воды преобладают в структуре водоснабжения практически во всех европейских странах, а также в других регионах мира. В России доля подземных вод в водоснабжении городов составляет 35–40 %; для сельских населенных пунктов – более 80 % [2, 5, 10].

Качество подземных вод, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения, оценивается по органолептическим и радиационным показателям, химическому составу и бактериальному загрязнению. Гигиенические требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения, источником которого являются подземные воды, определяются Санитарно-эпидемиологическими правилами и нормами СанПиН 2.1.4.1175–02. По органолептическим показателям питьевая вода должна быть прозрачна, бесцветна, не иметь неприятного запаха и вкуса. Величина сухого остатка не должна превосходить 1 г/л, общая жесткость – 7,0 мг-экв/л, содержание железа – 0,3 мг/л. Содержание отдельных растворенных веществ не должно превышать предельных значений, допустимых нормами.

В исключительных случаях могут быть использованы подземные воды с сухим остатком до 1,5 г/л, общей жесткостью до 10 мг-экв/л, содержанием железа до 1 мг/л, но только по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы. В питьевой воде совершенно недопустима патогенная флора, т.е. болезнетворные микробы. Бактериальное загрязнение оценивается по «коли-титру» и «коли-индексу». Подземная вода пригодна для питья при большом «коли-титре» (не менее 300 мл) и малом «коли-индексе» (не более 3).

В целом, согласно Санитарным правилам питьевая вода должна быть безопасна в эпидемическом и радиационном отношении, безвредна по химическому составу, а также должна иметь благоприятные органолептические показатели.

Оценка качества подземных вод для технических целей зависит от характера того или иного производства. Для разных производств нужны воды различного качества.

Подземные воды подпитывают поверхностные водные объекты, существенно влияя как на их водность, так и на их режим.

Однако подземные воды – не только ценнейший источник водоснабжения, но и фактор, значительно осложняющий строительство. Особенно сложным является производство земляных и горных работ в условиях притока подземных вод, затапливающих котлованы, карьеры, траншеи. Подземные воды ухудшают механические свойства рыхлых, особенно глинистых пород, могут быть агрессивной средой для металлических и бетонных сооружений, способствуют развитию неблагоприятных геологических процессов (подтопление, оползневые смещения, прорывы плавунных песков и др.). Поэтому в процессе инженерно-геологических исследований изучению подземных вод уделяют особое внимание.

## 6.2. Интенсивность водообмена подземных вод

В процессе круговорота воды в природе происходит постоянное возобновление природных вод, в том числе и подземных. Процесс смены первоначально накопившихся вод поступающими вновь называют *водообменом*. Подсчитано, что в круговороте воды на Земле ежегодно участвует более 500 тыс. км<sup>3</sup> воды. Наиболее активно возобновляются речные воды.

*Интенсивность водообмена* подземных вод различна и зависит от глубины их залегания. По Н.К. Игнатовичу, в верхней части земной коры выделяют следующие вертикальные зоны:

- *Зона интенсивного водообмена* (воды преимущественно пресные) расположена в самой верхней части земной коры до глубины 300–400 м, реже более. Подземные воды этой зоны дренируются реками. В масштабе геологического времени – это воды молодые. Водообмен осуществляется за десятки и тысячи лет.

- *Зона замедленного водообмена* (воды солоноватые и соленые) занимает промежуточное положение и располагается до глубины 600–2000 м. Обновление вод в процессе круговорота происходит в течение сотен тысяч лет.

- *Зона весьма замедленного водообмена* (воды типа рассолов) приурочена к глубоким зонам земной коры и полностью изолирована от поверхностных вод и атмосферных осадков. Водообмен – в течение сотен миллионов лет.

Наибольшее значение для водоснабжения имеют подземные воды, циркулирующие в зоне интенсивного водообмена. Постоянно пополняясь атмосферными осадками и водами поверхностных водоемов, они, как правило, отличаются значительными запасами и высоким качеством. Воды двух нижних зон, расположенных до глубины 10–15 км, практически в процессе круговорота не возобновляются, запасы их не пополняются.

Ниже глубины 10–15 км вода предположительно находится в парообразном состоянии.

### 6.3. Происхождение подземных вод

Существуют две основные *теории происхождения подземных вод*: инфильтрационная и конденсационная.

*Инфильтрационная теория* объясняет образование подземных вод просачиванием (инфильтрацией) вглубь Земли атмосферных осадков и поверхностных вод. Просачиваясь по крупным трещинам и порам, вода задерживается на водонепроницаемых слоях и дает начало подземным водам. Процесс инфильтрации атмосферных осадков весьма сложный.

Питание подземных вод инфильтрационным путем изменчиво во времени и определяется природными условиями района: рельефом, водопроницаемостью пород, растительным покровом, деятельностью человека и т.д.

Для определения величины инфильтрационного питания  $Q_{и.п}$  необходимо знать интенсивность инфильтрации атмосферных осадков  $Q_{инф}$  и испарения  $Q_{и}$ :

$$Q_{и.п} = Q_{инф} - Q_{и} \quad (6.1)$$

При понижении уровня подземных вод испарение с их поверхности уменьшается, а на некоторой глубине становится равным нулю. В этих условиях величина инфильтрационного питания подземных вод возрастает.

*Конденсационная теория* предполагает возникновение подземных вод в связи с конденсацией водяных паров, которые проникают в поры и трещины из атмосферы.

В настоящее время эти две теории не противопоставляются, а взаимно дополняют друг друга. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что атмосферная вода может проникать в горные породы как в капельно-жидком состоянии, так и в виде пара (в меньших количествах).

Инфильтрационный путь образования подземных вод является основным для подземных вод, залегающих в зоне активного водообмена, в районах с достаточно высоким количеством атмосферных осадков. В районах с небольшим их количеством (пустыни, сухие степи) роль конденсации водяных паров в образовании и питании подземных вод существенно возрастает.

Минерализованные (соленые) воды глубоких зон земной коры, находящиеся в зонах замедленного и весьма замедленного водообмена, имеют *седиментационное* происхождение. Эти воды образовались после отложения (седиментации) древних морских осадков и последующего отжатия из них воды вследствие уплотнения пород.

Воды земной коры постоянно в течение длительного геологического времени пополняются и *ювенильными* водами, которые возникают в глубине Земли за счет кислорода и водорода, выделяемых магмой. Прямой выход на поверхность Земли в виде паров и горячих источников ювенильных вод проявляется при вулканической деятельности.

#### 6.4. Классификация подземных вод

Единая общепринятая классификация подземных вод до сих пор не создана. Это связано с большим разнообразием их свойств, условий залегания, движения и т.д. Подземные воды можно подразделить по ряду признаков. Наибольший практический интерес представляет классификация подземных вод по характеру их использования для технических и других целей и по условиям залегания в земной коре.

1. *По характеру использования* подземные воды подразделяют на хозяйственно-питьевые, технические, промышленные, минеральные, термальные.

*Хозяйственно-питьевые воды* подземные воды широко используются для хозяйственно-питьевых целей. Пресные подземные воды – лучший источник питьевого водоснабжения, поэтому использование их для других целей, как правило, не допускается.

Источником хозяйственно-питьевого водоснабжения являются подземные воды зоны интенсивного водообмена. Глубина залегания пресных подземных вод от поверхности земли обычно не превышает нескольких десятков метров. Однако имеются районы, где они залегают на больших глубинах (300–500 м и более).

*Технические воды* – это воды, которые используют в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Требования к подземным техническим водам отражают специфику того или иного вида производства. В отличие от питьевых качество технических вод оценивается, прежде всего, по величине жесткости.

Промышленные воды содержат в растворе полезные элементы (бром, йод и др.) в количестве, имеющем промышленное значение. Обычно они залегают в зоне весьма замедленного водообмена, минерализация их высокая (от 20 до 500–600 г/л), состав хлоридно-натриевый, температура нередко достигает 60–80 °С.

Эксплуатация промышленных вод с целью добычи йода и брома рентабельна лишь при глубине залегания вод не более 3 км, уровне воды в скважине не ниже 200–600 м, количестве извлекаемой воды в сутки не менее 200–500 м<sup>3</sup>.

*Минеральными называют* подземные воды, которые имеют повышенное содержание биологически активных микрокомпонентов, газов,

радиоактивных элементов и т.д. Минеральные воды выходят на поверхность земли естественным путем, т.е. в виде источников, или вскрываются с помощью буровых скважин.

*Термальные воды* имеют температуру более 37 °С. Они залегают повсеместно на глубинах от нескольких десятков и сотен метров (в горноскладчатых районах) до нескольких километров (на платформах). По трещинам термальные воды часто выходят на поверхность земли, образуя горячие источники с температурой до 100 °С (Камчатка, Кавказ). Разнообразием горячих источников являются гейзеры, выбрасывающие струю пара и воды на высоту до нескольких десятков метров.

Общие запасы термальных вод в нашей стране оцениваются миллионами кубометров. Термальные воды уже используются для теплофикации некоторых городов и сельскохозяйственных объектов, а также для энергетических целей (Паужетская геотермальная станция на Камчатке и др.).

2. По условиям залегания в земной коре подземные воды подразделяют на два типа – безнапорные и напорные.

Слой, или пласт, горных пород, насыщенный подземной водой, именуют *водоносным слоем (пластом) или водоносным горизонтом*. Расстояние от водоупора до уровня подземных вод называется *мощностью водоносного горизонта* (пласта).

Горизонты *безнапорных вод* не имеют сплошного непроницаемого покрытия. В таких горизонтах устанавливается свободный уровень воды (давление на этом уровне равно атмосферному), глубина которого соответствует поверхности водоносных пород. При вскрытии безнапорного горизонта скважиной уровень воды в ней установится на отметке свободного уровня воды водоносного горизонта.

*Напорные воды* заключены между водонепроницаемыми слоями – кровлей и подошвой. Область питания напорного водоносного горизонта всегда будет расположена на более высоких отметках, чем его водоупорная кровля. При вскрытии напорного горизонта скважиной уровень воды в ней установится выше отметки кровли – на напорном (пьезометрическом) уровне воды. Порой отметка пьезометрического уровня напорного водоносного горизонта будет выше отметки земли, тогда скважина будет фонтанировать – самоизливаться.

Воды первого от поверхности сплошного водоносного горизонта называют *грунтовыми* (рис. 6.1). Свободную поверхность грунтовых вод называют зеркалом (в разрезе – уровнем). Обычно грунтовые воды залегают на небольшой глубине – от 2 до 10 м.

Питание грунтовых вод происходит за счет инфильтрации (просачивания) атмосферных осадков и конденсации водяных паров, а также поступления воды из поверхностных водоемов (рек, озер и т.д.). Значительно реже грунтовые воды подпитываются со стороны глубокозалегающих на-

порных вод. Территория, на которой происходит питание водоносного горизонта, называется *областью питания*. Для грунтовых вод характерно совпадение областей питания и распространения.

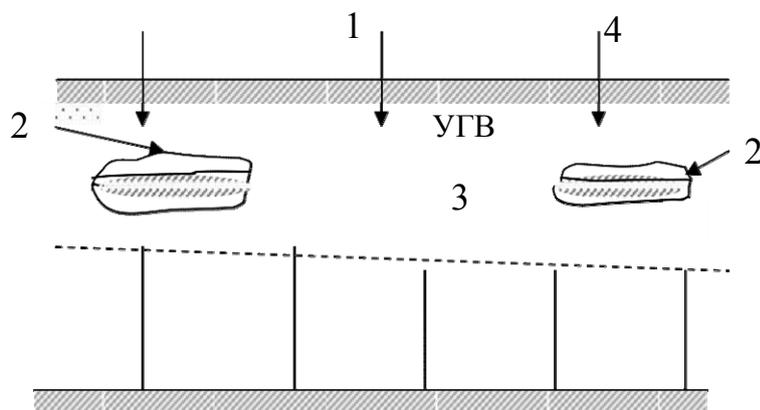


Рис. 6.1. Схема условий залегания грунтовых вод и верховодки:  
1 – водопроницаемая порода; 2 – водоупорные породы;  
3 – грунтовая вода; 4 – верховодка

По степени минерализации воды преимущественно пресные, реже солоноватые и соленые, состав гидрокарбонатно-кальциевый, сульфатный и сульфатно-хлоридный. Грунтовые воды широко используют для водоснабжения во многих районах России.

Линзообразные скопления воды на водоупорах или слабопроницаемых слоях (линзы глин и суглинков в песке, прослойки плотных пород), имеющие локальное распространение, образуют *верховодку*, которая располагается над грунтовыми водами. При инфильтрации вода временно задерживается на них и образует своеобразный тип подземной воды. Чаще всего это бывает связано с периодом обильного снеготаяния и выпадения дождей. В засушливое время года верховодка может полностью исчезнуть в результате испарения и просачивания в нижележащие слои.

Наиболее типичны для верховодки различные суглинки и лессовые породы. Порой верховодка образуется даже при отсутствии каких-либо водоупорных пропластков. Например, в толщу суглинков обильно поступает вода, но вследствие низкой водопроницаемости просачивание происходит замедленно и в верхней части толщи образуется верховодка. Через некоторое время эта вода рассасывается.

На склонах верховодка практически отсутствует. Чаще всего она наблюдается на водораздельных равнинных участках, особенно в понижениях микрорельефа (степные блюдца, западины и т.п.), задерживающих талые снеговые и дождевые осадки.

Близость верховодки к поверхности земли часто приводит к ее загрязнению органическими соединениями. Водообильность её незначительная, поэтому использование верховодки для водоснабжения ограничено: неглубо-

кие колодцы в сельской местности, сезонное водоснабжение мелких предприятий. Для постоянного водоснабжения верховодка непригодна.

Верховодка представляет значительную опасность для строительства. Залегая в пределах подземных частей зданий и сооружений, она может вызвать их подтопление, если заранее не были предусмотрены меры дренирования или гидроизоляции. В результате значительных утечек воды (водопровод, канализационные сети, бассейны и др.) отмечено частое появление горизонтов верховодок на площадках многих объектов, расположенных в зоне распространения лессовых пород. Это представляет серьезную опасность, так как грунты оснований снижают свою устойчивость, затрудняется эксплуатация сооружений.

*Межпластовыми водами* называют водоносные горизонты, залегающие между двумя водоупорными слоями. В зависимости от условий залегания они могут иметь свободную поверхность или обладать напором.

Проницаемый пласт, ограниченный двумя водоупорами, может быть не заполнен водой; при этом образуются безнапорные или слабонапорные *межпластовые воды* (см. рис. 6.1). *Межпластовые ненапорные воды* встречаются сравнительно редко. Уровень этих вод располагается ниже кровли первого водоупора, т.е. водопроницаемый слой не имеет полного заполнения. По условиям передвижения и характеру напоров эти воды аналогичны грунтовым водам. Однако область питания межпластовых вод не совпадает с областью их распространения. Питание вод происходит на участках выхода водоносного пласта на дневную поверхность или путем фильтрации из рек и других поверхностных водотоков и водоемов.

Верховодка и грунтовые воды относятся к безнапорным водам. Межпластовые воды бывают безнапорными и напорными, последние иначе называют *артезианскими*.

Верхняя часть земной коры в зависимости от степени насыщения водой пор горных пород делится на две зоны: верхнюю – зона аэрации и нижнюю – зона насыщения (рис. 6.2).

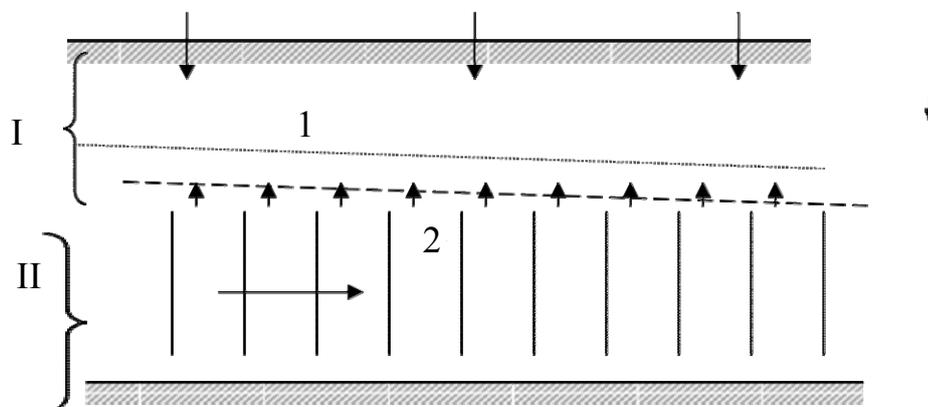


Рис. 6.2. Зоны земной коры:  
I – аэрации; II – насыщения;  
1 – капиллярная кайма; 2 – уровень грунтовых вод

*Зона аэрации* расположена между поверхностью земли и уровнем грунтовых вод. В этой зоне, непосредственно связанной с атмосферой и почвенным покровом, наблюдается просачивание атмосферных осадков и поверхностных вод вглубь, в сторону зоны насыщения. Поры горных пород в зоне аэрации лишь частично заполнены водой, остальная часть их занята воздухом. Зона аэрации играет важную роль в формировании подземных вод. Мощность, т.е. толщина, зоны аэрации колеблется от нуля в заболоченных низинах до нескольких сотен метров в горных районах с сильно расчлененным рельефом.

Непосредственно над поверхностью подземных вод располагается зона повышенной влажности – капиллярная кайма. Мощность каймы зависит от состава и структуры и других свойств горных пород.

*Зона насыщения горных пород* расположена ниже уровня грунтовых вод. В этой зоне все поры, трещины, каверны и другие пустоты заполнены гравитационной водой.

Помимо этих основных типов подземных вод выделяют также *трещинные, карстовые* и подземные воды районов *многолетней мерзлоты*. Подземные воды в зоне насыщения циркулируют в виде грунтовых, артезианских, трещинных и других вод.

Мощность зоны насыщения, так же, как и зоны аэрации, изменяется соответственно изменению уровня грунтовых вод.

Грунтовые воды находятся в непрерывном движении, образуя *грунтовые потоки*. В отдельных случаях их залегание имеет форму *грунтовых бассейнов*. Грунтовые воды в бассейнах остаются неподвижными и имеют горизонтальную поверхность. В противоположность им грунтовые потоки имеют соответствующие уклоны своей поверхности. Уклон поверхности грунтового потока обычно соответствует уклону рельефа поверхности земли и направлен в сторону ближайшего понижения. Грунтовые воды движутся от водоразделов к речным долинам, оврагам, балкам и т.п. В местах выхода грунтовых вод на поверхность образуются родники, мочажины, заболоченность. Это места естественной разгрузки (дренирования) грунтовых вод.

Грунтовые воды имеют почти повсеместное распространение. Глубина залегания грунтовых вод, химический состав и температура зависят от многих факторов: геологического строения района, рельефа местности, климатических условий. В целом зеркало грунтовых вод отражает рельеф земной поверхности. Наибольшая глубина залегания грунтовых вод отмечается на водоразделах, наименьшая – в понижениях рельефа.

На территории России отмечают следующие наиболее *характерные типы грунтовых вод*: речных долин; ледниковых отложений; степей и полупустынь; предгорных и горных районов.

*Грунтовые воды речных долин.* Характерной особенностью грунтового потока является его незначительная ширина в сравнении с длиной.

Водовмещающими породами являются песчаные и крупнообломочные аллювиальные (речные) отложения (рис. 6.3). В долинах равнинных рек это песок, песок с гравием, реже галечник, в долинах горных рек – валуны, галечник и гравий с песчаным заполнителем. Сверху рыхлообломочные породы часто покрыты иловатыми суглинками, супесями и глинами.

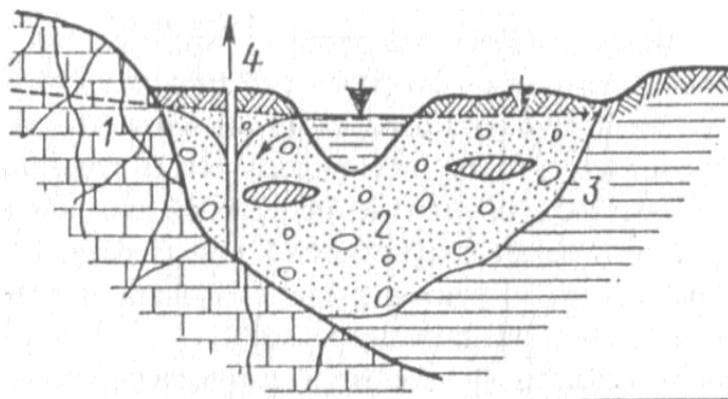


Рис. 6.3. Вода в речных отложениях:  
1 – водоносные известняки; 2 – речные отложения;  
3 – водоупорные глины; 4 – водозаборные скважины

Подземные воды в аллювиальных отложениях обычно безнапорны. Глубина залегания грунтовых вод обычно составляет от долей метра до 20 м и более (на повышенных участках долины). Мощность водоносной толщи пород обычно не превышает 20–35 м. Наиболее водообильны крупнообломочные образования русловых отложений рек.

Роль грунтовых вод речных долин в водоснабжении населенных пунктов и промышленных предприятий весьма значительна. Воды аллювиальных отложений широко используются для водоснабжения городов Красноярска, Новосибирска, Воронежа, Уфы и многих других городов, расположенных в долинах крупных рек.

*Грунтовые воды ледниковых отложений* (рис. 6.4) распространены в районах с избыточным увлажнением и невысоким испарением, поэтому питание их вполне обеспечено, а динамические запасы (естественные ресурсы) значительны. Грунтовые воды водно-ледниковых песков пресные с общей минерализацией 300–600 мг/л. В ряде районов они нуждаются в обезжелезивании и фторировании. Близкое залегание надморенных вод от поверхности земли требует тщательной охраны их от загрязнения.

Подземные воды ледниковых отложений широко используются для водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий северных и центральных областей европейской части России. Большие запасы пресных вод приурочены также к древним ледниковым долинам.

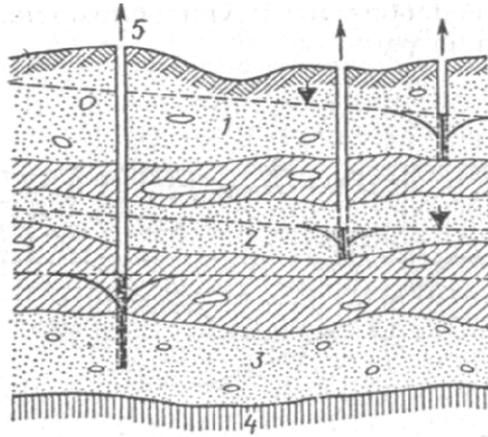


Рис. 6.4. Подземные воды в ледниковых отложениях:  
 1 – грунтовые воды; 2 – межпластовые ненапорные (межморенные);  
 3 – артезианские воды (подморенные); 4 – дочетвертичные породы;  
 5 – водозаборные скважины

Условия формирования *грунтовых вод сухих степей и полупустынь* неблагоприятны. Влага интенсивно испаряется здесь не только с открытой водной поверхности, но и с поверхности грунтовых вод, вызывая засоление почвенного покрова, образование солончаков и др. Грунтовые воды движутся медленно, их минерализация, как правило, высокая. Все это создает значительные трудности при решении вопросов водоснабжения, особенно в полупустынях и пустынях. Однако и на их территориях, на отдельных участках могут быть обнаружены достаточные запасы пресных подземных вод.

*Грунтовые воды предгорных и горных районов.* Наибольший интерес для водоснабжения в предгорных районах представляют *воды конусов выноса*. Конус выноса – это скопление рыхлообломочного материала (гальки, песка, гравия) в устьевой части горных потоков, в местах их выхода на равнину. Мощность грубозернистых отложений в конусе выноса огромна (от нескольких сот метров до 2–3 км). Пресные грунтовые воды распространены в головной части конусов выноса (области питания), сложенной крупнообломочным материалом и в зонах интенсивного выклинования. Запасы их значительны.

В горных районах подземных вод меньше, чем в предгорных. Мощные потоки пресных грунтовых вод встречаются лишь в аллювиальных отложениях долин горных рек.

Для выявления характера поверхности грунтовых вод составляют *карты гидроизогипс* (рис. 6.5). Гидроизогипсами называют линии, соединяющие точки с одинаковыми абсолютными или относительными отметками уровней грунтовых вод. Эти линии аналогичны горизонталям рельефа местности и подобно им отражают рельеф зеркала вод. Форма поверхности грунтовых вод сложная и зависит от многих факторов: со-

става водовмещающих пород и их водопроницаемости, рельефа, условий залегания и дренирования.

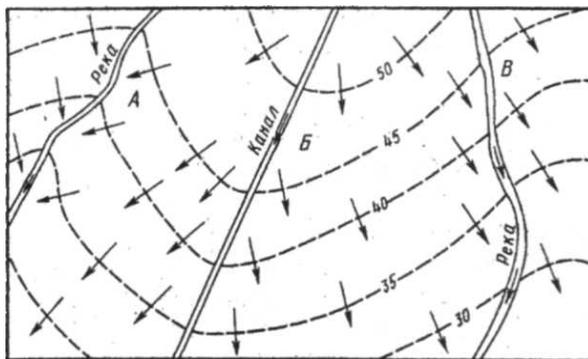


Рис. 6.5. Карта гидроизогипс:  
 А – грунтовые воды питают реку; Б – канал питает грунтовые воды;  
 В – грунтовые воды питают реку и выходят из нее

Карты гидроизогипс необходимы при решении многих задач, связанных с проектированием водозаборов подземных вод, борьбой с подтоплением территории и др. Для построения карты гидроизогипс замеряют уровни грунтовых вод в скважинах, расположенных обычно по сетке. Замеры уровней воды должны быть единовременными. Абсолютные отметки уровня подземных вод ( $H_B$ ) в скважинах определяют по формуле

$$H_B = h_{п.з} - h, \quad (6.2)$$

где  $h_{п.з}$  – абсолютная отметка поверхности земли;

$h$  – глубина залегания подземных вод от поверхности земли, м.

Полученные абсолютные отметки надписывают над каждой скважиной, и затем методом интерполяции строят гидроизогипсы. Сечение гидроизогипс (частоту их заложения) выбирают в зависимости от масштаба карты и густоты расположения точек замера от 0,5 до 10,0 м, чаще 0,5; 1,0 и 2,0 м.

С помощью карты гидроизогипс можно определить направление и скорость движения грунтового потока в любой точке.

Артезианские воды обычно залегают на большой глубине и приурочены к *синклинальным* (прогнутым) геологическим структурам. При синклинальном залегании пластов создаются наиболее благоприятные условия для образования гидростатического напора. Напорные воды встречаются и при односклоновом залегании водоносных пластов, если последние резко изменяют свою водопроницаемость или выклиниваются. Они могут быть приурочены также и к зонам тектонических нарушений и разломов.

Геологические структуры синклинального типа, содержащие один или несколько напорных водоносных горизонтов и занимающие значительные площади (до нескольких сотен тысяч квадратных километров), назы-

вают *артезианскими бассейнами* (рис. 6.6). При односклоновом залегании слоев образуется *артезианский склон* (рис. 6.7).

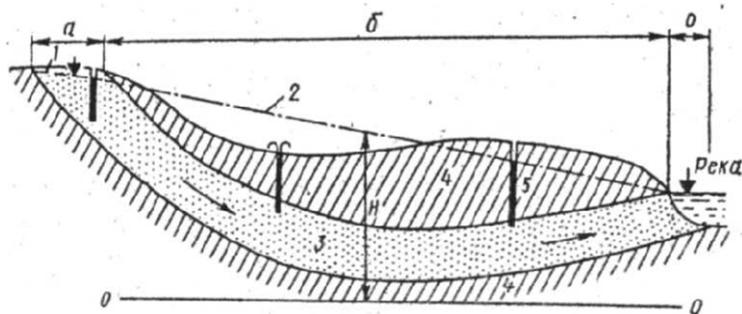


Рис. 6.6. Артезианский бассейн, области: а – питания напорных вод; б – напора; в – разгрузки; 1 – уровень грунтовых вод; 2 – пьезометрический уровень напорных вод; 3 – водоносный напорный пласт; 4 – водоупоры; 5 – скважины;  $H$  – величина пьезометрического напора

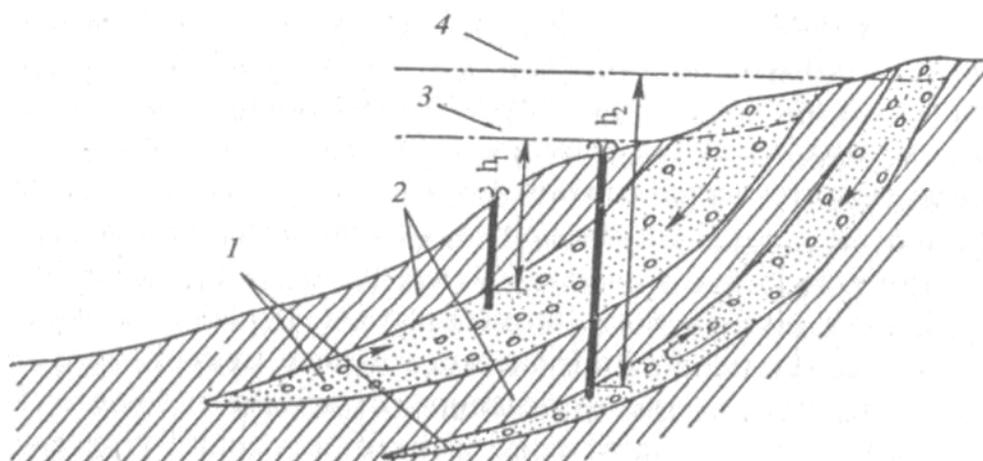


Рис. 6.7. Артезианский склон: 1 – водоносные напорные пласты; 2 – водоупорные породы; 3 – водоносный напорный пласт; 4 – пьезометрические уровни;  $h_1, h_2$  – напор воды

#### Основные элементы артезианского бассейна

В артезианских бассейнах выделяют три области: питания, напора (распространения) и разгрузки (рис. 6.6).

*Область питания* распространена в приподнятой части артезианского бассейна, в месте выхода водопроницаемых слоев на поверхность. На ее территории происходит инфильтрационное питание напорных вод и переход поверхностного стока в подземный. Подземные воды в этой области не обладают напором и относятся к типу грунтовых.

В местах с низкими отметками рельефа (долины крупных рек, озерные впадины, побережья морей) обычно располагаются *области разгрузки*

*артезианских вод*. Напорные воды разгружаются непосредственно в реки или отложения рек, под уровень моря или выходят на дневную поверхность, образуя родники и заболоченности. В области разгрузки напорные воды смешиваются с грунтовыми и становятся ненапорными. Общее направление движения артезианских вод – от области питания к области разгрузки.

Основную площадь артезианского бассейна занимает *область напора* (распространения). На ее территории подземные воды находятся под постоянным напором.

Под напором принято понимать величину потенциальной энергии (энергии положения), которой обладает единица веса воды. Напор воды создается благодаря перепаду отметок высот областей питания и разгрузки, т.е. обусловлен законом сообщающихся сосудов. Поэтому напор подземных вод называют удельной энергией положения и измеряют в линейных единицах – метрах. Величина напора вод характеризуется уровнем, который устанавливается в скважинах при вскрытии напорных вод до начала откачки (пьезометрическим или статическим уровнем).

Высота столба воды в метрах, отсчитываемая от кровли водного пласта, называется напором над кровлей  $h$  (рис. 6.8). Абсолютное значение напора выражает пьезометрический напор  $H$ , который отсчитывается от плоскости сравнения 0-0 (уровень Балтийского моря) до пьезометрического уровня. Высота пьезометрического напора отсчитывается часто не от плоскости сравнения, а от подошвы напорного водоносного пласта.

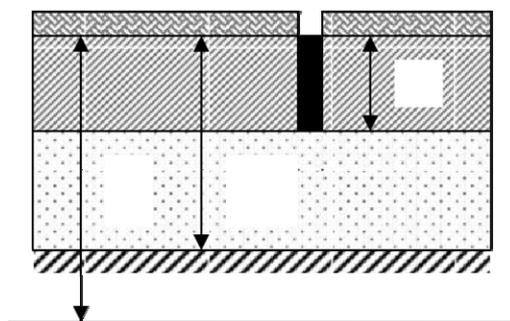


Рис. 6.8. Схема определения напоров подземных вод:  
 $H$  – пьезометрический напор надплоскостью сравнения 0-0;  
 $H_{п}$  – пьезометрический напор над подошвой водоносного пласта;  
 $h$  – напор над кровлей пласта

При использовании артезианских вод для водоснабжения наиболее перспективным считается самый верхний напорный горизонт, где обычно залегают слабоминерализованные (пресные) воды.

Артезианские воды практически не загрязнены и, как правило, обладают значительной водообильностью. К недостаткам следует отнести необходимость в ряде случаев проходки очень глубоких скважин для вскрытия напорного водоносного горизонта.

На территории России расположено несколько *крупных артезианских бассейнов*, т.е. значительных по размерам геологических структур, к которым приурочены напорные воды. Площади артезианских бассейнов измеряются десятками и сотнями тысяч квадратных километров. Наиболее крупные из них – Западно-Сибирский, Московский, Якутский и др. В артезианских бассейнах сосредоточены огромные естественные запасы пресных, а также минеральных, промышленных и термальных вод.

*Московский артезианский бассейн* расположен на огромной территории (около 500 тыс. км<sup>2</sup>), в пределах Восточно-Европейской равнины. Мощность осадочного чехла, содержащего более 15 водоносных горизонтов различного возраста, составляет в центре бассейна около 3 км. Пресные воды артезианского бассейна широко используются для водоснабжения городов Москвы, Калуги, Тулы, Смоленска и др. В то же время подземные воды артезианского бассейна значительно осложняют проходку и эксплуатацию метрополитена в Москве, шахт в Подмосковном угольном бассейне и др., так как являются основными источниками их обводнения.

Московский артезианский бассейн характеризуется огромными запасами промышленных (бромных, йодо-бромных и др.) и минеральных вод.

Самым крупным на территории России является *Западно-Сибирский артезианский бассейн*. Площадь бассейна – около 3,5 млн км<sup>2</sup>, мощность осадочного чехла в его центральной части – 5–7 км. Для водоснабжения основное значение имеет верхний этаж, отделенный от нижнего гидрогеологического этажа мощной толщей песчано-глинистых отложений. Эксплуатационные запасы пресных и солоноватых вод только верхней части артезианского бассейна составляют 1100 м<sup>3</sup>/с. Велики запасы минеральных и термальных вод.

Мощными аккумуляторами подземных вод на территории России являются и другие артезианские бассейны платформенного типа: Якутский, Азово-Кубанский, Причерноморский, Ангаро-Ленский и др.

Артезианские бассейны занимают лишь часть территории России. На остальной части территории распространены гидрогеологические массивы, приуроченные к поднятиям кристаллического фундамента, и складчатые области с преимущественным развитием *трещинных вод*. Известны, например, бассейны трещинных вод Алданского кристаллического массива, Саяно-Алтайской и Уральской складчатых областей.

*Подземные воды в районах многолетней мерзлоты* (Сибирь, Крайний Север, Дальний Восток и др.) характеризуются своеобразными условиями залегания, циркуляции и стока. Главная их особенностью этих вод заключается в том, что они постоянно контактируют или непосредственно содержатся в толще пород с постоянной промороженностью.

Многолетнемерзлые породы имеют мощность от нескольких метров до нескольких сот метров, содержат участки с постоянно положительной температурой (талики) и только в верхней части сезонно протаивают (деятельный слой).

По количеству подземных вод районы многолетней мерзлоты уступают районам с умеренным климатом. Поверхностные же источники промерзают на длительный период, поэтому организация водоснабжения в этих районах представляет значительные трудности. С подземными водами связан и ряд геологических явлений, осложняющих строительство в районах с суровым климатом (наледы, бугры пучения и т.д.).

Подземные воды в районах многолетней мерзлоты классифицируют, по Н.И. Толстихину, на надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные.

*Надмерзлотные воды* подразделяют на воды сезонно-талого (деятельного) слоя и воды надмерзлотных таликов речных долин и озерных впадин. Подстилающим водупором для них служит многолетнемерзлая толща, пустоты, трещины, поры которой постоянно заполнены льдом. Надмерзлотные воды образуют безнапорные горизонты типа верховодки и грунтовых вод. Питание надмерзлотные воды получают за счет инфильтрации осадков, таяния снежников и ледников, а также подпитывания в результате разгрузки подмерзлотных вод.

В первой половине зимы надмерзлотные воды деятельного слоя промерзают, и поскольку в этот период они залегают между двумя водупорными слоями (снизу – толща многолетнемерзлых пород, сверху – горизонт сезонного промерзания), то развивают значительное давление и становятся напорными. По величине минерализации воды пресные и летом могут использоваться для водоснабжения, однако количество (запасы) их незначительно, а санитарно-техническое состояние не всегда удовлетворительно.

Надмерзлотные воды в зоне таликов под влиянием переноса тепла реками и озерами зимой обычно не промерзают и имеют постоянный сток. Это воды пресные, очень холодные (температура 0,5–5 °С), используются для водоснабжения.

*Межмерзлотные воды* содержатся внутри толщи многолетней мерзлоты как в твердой (лед), так и в жидкой фазе (зона прерывистых и сквозных таликов). Межмерзлотные воды в жидкой фазе обычно напорны. Распространены они не повсеместно и залегают в пределах таликов преимущественно в долинах рек. Постоянная циркуляция, отчасти высокая минерализация, предохраняет их от замерзания. Запасы межмерзлотных вод непостоянны и к концу зимы значительно сокращаются.

*Подмерзлотные воды* циркулируют ниже многолетнемерзлотной толщи, поэтому встречаются только в жидкой фазе. Воды напорны, величина напора над кровлей нередко достигает нескольких сотен метров.

По условиям циркуляции подмерзлотные воды аналогичны напорным водам в районах с умеренным климатом. Запасы подмерзлотных вод значительны. Водообильность высокая, особенно карстовых подмерзлотных вод. Минерализация вод пестрая (от пресных до рассолов).

## 6.5. Естественные выходы подземных вод на поверхность

### 6.5.1. Общие сведения об источниках

Естественный выход подземных вод на земную поверхность называют *источником* (или родником, ключом, криницей). В сущности, источник – это естественное вскрытие подземных вод. По А.М. Овчинникову, источники можно рассматривать как своеобразные природные сооружения, из которых ведется откачка воды.

Количество воды, которое дает источник в единицу времени, называется *дебитом* или *расходом источника* (л/с, м<sup>3</sup>/сут).

Наибольший практический интерес представляет классификация источников по характеру их выхода на поверхность (гидродинамическому признаку), т.е. разделение их на нисходящие и восходящие (рис. 6.9).

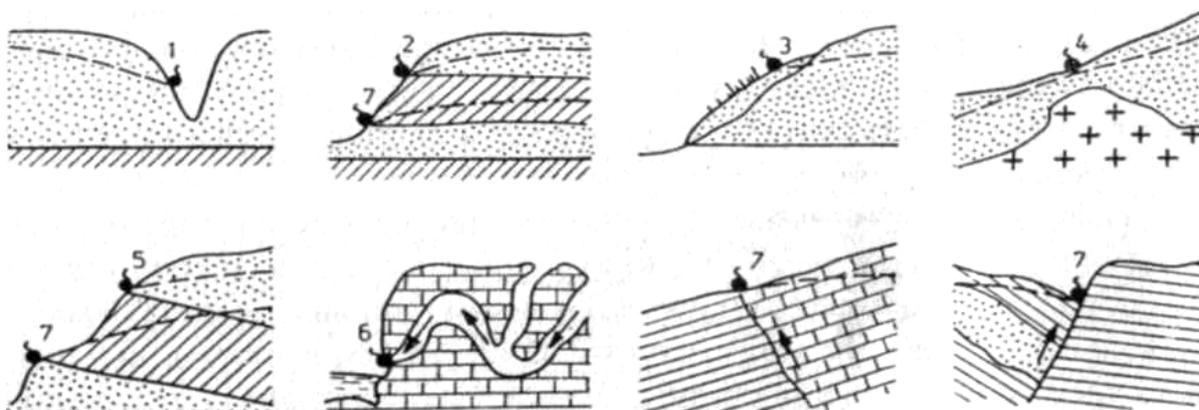


Рис. 6.9. Виды источников подземных вод (по П. В. Гордееву и др., 1990):  
1–5 – нисходящие источники:

- 1 – эрозионные; 2 – контактовые; 3 – эрозионные при подпоре делювием;
- 4 – барражные (при подпоре на глубине магматическими породами);
- 5 – переливающиеся; 6 – карстовые; 7 – восходящие источники

### 6.5.2. Нисходящие источники

*Нисходящие источники* образуются при естественном выходе на дневную поверхность безнапорных вод. Подземная вода к нисходящему источнику движется сверху вниз: от области питания к области дренирования, где она и выходит на поверхность. Источники этого типа встречаются

в пониженных частях рельефа (речных долинах, оврагах, балках) и в зонах контакта пород различной водопроницаемости.

Различают источники сосредоточенные, т.е. выходящие в одном месте, и рассредоточенные, когда грунтовая вода выходит в виде отдельных источников вдоль склона оврага или речной долины.

Среди нисходящих источников для водоснабжения чаще всего используют источники карстовых и грунтовых вод.

*Карстовые источники* образуются при выходе подземных вод из трещин и полостей закарстованных пород. Дебит карстовых источников достигает огромных величин – нескольких кубических метров в секунду. Так, например, дебит источника Красный Ключ в долине р. Уфы равен  $15 \text{ м}^3/\text{с}$  (в период снеготаяния  $30\text{--}50 \text{ м}^3/\text{с}$ ), в районе г. Гагры –  $8 \text{ м}^3/\text{с}$ . Крупные карстовые источники имеются и в других карстовых районах.

Источники грунтовых вод образуются в основном эрозионным путем, т.е. при вскрытии грунтовых вод речными долинами, оврагами, балками или при подпруживании грунтового потока водоупорными породами. Дебит источников грунтовых вод обычно не превышает нескольких десятков  $\text{м}^3/\text{ч}$ . Этого дебита бывает достаточно для удовлетворения потребностей в воде небольших предприятий и населенных пунктов.

### 6.5.3. Восходящие источники

Восходящие источники образуются при выходе на поверхность напорных вод. Чаще всего они приурочены к скальным трещиноватым породам. Движение воды к источникам направлено снизу вверх. Восходящий источник можно определить по колебанию в выходящей струе взвешенных песчинок, а также по выделению пузырьков воздуха и газов.

Восходящие источники являются очагами разгрузки артезианских, трещинно-жильных, межмерзлотных и подмерзлотных вод. Значительно реже встречаются восходящие карстовые источники.

Воды восходящих источников, имеющие лечебное значение, называются *бальнеологическими* или *минеральными*. Широко известны железистые источники Железноводска и Ижевска, углекислые источники Ессентуков, Боржоми и Карловых Вар, сероводородные источники Пятигорска, Мацесты, Цхалтубо.

Источники с температурой более  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  (гейзеры) периодически фонтанируют в районах молодой вулканической деятельности (Камчатка, Исландия и др.) и используются для горячего водоснабжения и отопления.

Пригодность источников для практического использования оценивают по результатам продолжительных (не менее 1 года) наблюдений за изменением их дебита и качества. Для водоснабжения важно знать минимальный и максимальный дебиты источника, продолжительность времени с минимальными дебитами, коэффициент неравномерности дебита  $K_n$ ,

представляющий собой отношение максимального за 1 год дебита к минимальному (табл. 6.1). За расчетное значение дебита источника следует принимать минимальный дебит, установленный за годовой период наблюдений.

Нисходящие источники в целом отличаются значительной изменчивостью дебита под влиянием метеорологических и других факторов. Исключительно непостоянны дебиты карстовых источников ( $K_n$  до 500–600). Воды этих источников подвержены наибольшим колебаниям по составу и физическим свойствам (мутность, бактериальное и химическое загрязнение), поэтому при использовании карстовых источников для водоснабжения необходимы тщательная гидрогеологическая их оценка и строгий санитарный надзор.

Т а б л и ц а 6 . 1

Классификация источников по изменчивости дебита

Группа	Степень изменчивости дебита	Коэффициент неравномерности
I	Весьма постоянные	1
II	Постоянные	1–2
III	Переменные	2–10
IV	Весьма переменные	10–30
V	Исключительно непостоянные	Более 30

Восходящие источники характеризуются более или менее постоянным дебитом, химическим составом и температурой.

Забор воды из источников осуществляется с помощью капотажных сооружений (водосборные камеры, неглубокие опускные колодцы). Прием воды из восходящих источников производится через дно капотажной камеры, а нисходящих – через ее стенки. При выходе источника из рыхлых водоносных пород в стенке или дне камеры устраивают обратный фильтр из песчано-гравийного материала.

## 6.6. Режим и баланс подземных вод

### 6.6.1. Режим подземных вод

Режим подземных вод – это изменение во времени их уровня, химического состава, температуры и расхода.

В естественных условиях для подземных вод характерен *ненарушенный (естественный) режим*, который формируется в основном под влиянием метеорологических, гидрологических и геологических факторов.

*Метеорологические факторы* (осадки, испарение, температура воздуха, атмосферное давление) – основные в формировании режима

грунтовых вод. Они вызывают сезонные и годовые (многолетние) колебания уровня, а также изменения химизма, температуры и расхода грунтовых вод.

*Сезонные колебания* уровня обусловлены неравномерностью выпадения осадков и изменениями температуры воздуха в течение года. Наиболее высокое положение уровня приходится на периоды весеннего снеготаяния (весенний максимум) и осенних дождей (осенний максимум). Наиболее низкое положение уровня в годовом цикле отмечается в конце лета – начале осени и в конце зимы. Разность между наивысшим и наименьшим горизонтом подземных вод называют *максимальной амплитудой колебания уровня*.

Обычно амплитуды сезонных колебаний грунтовых вод не превышают 2,5–3,0 м, а максимальные составляют 10–15 м (в долинах горных рек, сложенных галечниками и закарстованными известняками).

Подъем уровня начинается лишь через некоторое время после выпадения осадков. Этот отрезок времени тем больше, чем меньше водопроницаемость пород и больше глубина залегания грунтовых вод.

Уровень грунтовых вод колеблется не только по сезонам, но и в многолетнем цикле.

*Многолетние колебания уровня* связаны с ритмическими изменениями климата и приурочены к различным циклам, среди которых наиболее четко фиксируется 11-летний цикл. Амплитуды многолетних колебаний могут превышать амплитуды сезонных колебаний и достигать значительных размеров (до 8 м и более). Изучение многолетнего режима подземных вод необходимо для определения расчетной величины мощности водоносного горизонта, прогноза положения уровня на весь период длительной эксплуатации сооружений.

*Гидрологический режим рек* влияет на положение уровней подземных вод и их химизм в полосе шириной от 0,2–0,5 км (в песчано-глинистых отложениях) до 2–6 км в хорошо проницаемых породах. Колебания уровня подземных вод в речной долине с некоторым отставанием отражают колебания уровня реки.

В районах морских побережий уровень грунтовых вод изменяется под действием приливов и отливов.

*Геологические факторы* действуют на любом участке земной коры. С глубиной их значение увеличивается. Среди геологических факторов выделяют медленно действующие (колебательные тектонические движения, внутренняя теплота земного шара и др.) и эпизодические (землетрясения, вулканизм, оползни, грязевые вулканы).

В районах тектонических поднятий уровень подземных вод обычно снижается, так как породы лучше дренируются вследствие углубления эрозионных врезов (оврагов, долин). При опускании местности уровень

грунтовых вод повышается. При землетрясениях появляются новые и исчезают старые источники, существенно меняется термический режим, химический и газовый составы подземных вод. Вулканические явления сопровождаются выделением огромного количества тепла, что приводит к резкому изменению температуры, химизма и уровня подземных вод. Изменения в режиме подземных вод часто фиксируются еще до начала землетрясения и извержения магмы, поэтому могут быть одним из критериев активизации их деятельности.

Режим артезианских, карстовых и надмерзлотных вод в естественных условиях существенно отличается от режима грунтовых вод. В сравнении с грунтовыми водами уровень и химический состав артезианских вод подвержены значительно меньшим изменениям.

*Влияние метеорологических и гидрологических факторов* существенно лишь в областях питания и разгрузки, где артезианские воды гидравлически связаны с грунтовыми и поверхностными водами. В области напора пьезометрический уровень в скважинах колеблется под влиянием атмосферного давления, приливов и отливов, землетрясений.

Инженерно-строительная деятельность человека и другие *техногенные причины* изменяют естественные режимобразующие факторы и способствуют возникновению новых, так формируется *искусственный (или нарушенный) режим подземных вод*.

Повышению уровня подземных вод способствуют строительство водохранилищ и других искусственных водоемов, орошение, утечка воды из подземных коммуникаций, промышленных бассейнов, водохранилищ и т.д. Под влиянием искусственных (антропогенных) факторов уровни подземных вод могут подниматься на 10–15 м и более.

Особенно значительно обводняющее действие крупных водохранилищ. Так, уже через год после строительства Цимлянского водохранилища длиной 250 км и шириной до 20–30 км влияние подпора распространилось более чем на 6 км, а уровни грунтовых вод вблизи водохранилища поднялись на 5–7 м.

На орошаемых площадях вследствие просачивания оросительных вод уровень грунтовых вод повсеместно повышается. Это приводит к увеличению испарения грунтовых вод и повышению их минерализации, поэтому в нашей стране запрещено проектирование оросительных систем без применения дренажа.

В областях распространения лессовых пород на территориях жилых районов и особенно на участках промышленных сооружений уровень грунтовых вод с течением времени, как правило, повышается. Так, например, на территории завода Ростсельмаш в Ростове-на-Дону грунтовые воды за последние 45 лет поднялись на 18–20 м. Глубина залегания зеркала от поверхности земли в ряде случаев составила 1–3 м. Это связано с

утечкой воды из водопроводных и канализационных сетей, с уменьшением испарения воды вследствие застройки территории и т.д. Подобное явление называется *подтоплением*.

Понижение уровня подземных вод вызывается длительными откачками воды для водоснабжения, осушением заболоченных земель, строительным водопонижением, дренажем и другими причинами. Чем интенсивнее работы по отбору воды из недр земли, тем на большую глубину снижаются уровни подземных вод. В ходе режимных наблюдений установлено снижение уровней в районах крупных водозаборов до 100 м и более.

Техногенные факторы интенсивно воздействуют и на качество подземных вод. В силу различных причин минерализация, химический и бактериологический составы подземных вод с течением времени могут изменяться. В первую очередь, это отражается на оценке подземных вод для питьевого водоснабжения.

Весьма специфично влияние техногенных факторов в районах многолетней мерзлоты. Практически любое сооружение, возводимое в этих районах (водохранилища, очистные сооружения и т.д.), резко изменяет температуру и влажность мерзлых грунтов и оказывает существенное влияние на режим верхних горизонтов мерзлотных вод.

#### 6.6.2. Баланс подземных вод

Под балансом подземных вод понимают соотношение между приходом и расходом подземных вод на данном участке за определенное время. Режим и баланс подземных вод взаимосвязаны, и если первый отражает изменение количества и качества подземных вод во времени, то второй – результат этого изменения. Баланс может составляться для крупных территорий или для отдельных участков (поля орошения и фильтрации, групповые водозаборы и т.д.). Участки, где проводятся измерения прихода и расхода подземных вод, называют *балансовыми*.

С помощью баланса характеризуют водообеспеченность района и возможности ежегодного пополнения запасов подземных вод, изучают причины подтопления территорий, прогнозируют изменение уровня подземных вод.

Для решения этих вопросов необходимы данные о составляющих баланса: приходных и расходных.

*Приходная часть* баланса грунтовых вод под влиянием естественных режимобразующих факторов складывается из следующих составляющих (рис. 6.10): инфильтрации атмосферных осадков (А); конденсации водяных паров (К); подземного притока (П).

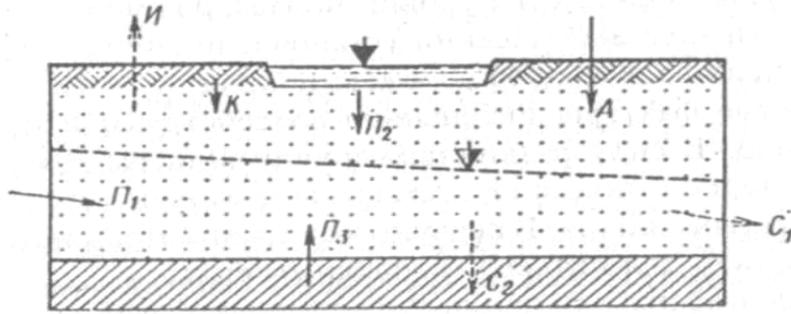


Рис. 6.10. Схема баланса грунтовых вод

Подземный приток, в свою очередь, включает боковой приток (П), фильтрационные поступления из поверхностных водных источников (реки, озера) (П<sub>2</sub>) и переток из нижележащего водоносного горизонта (П<sub>3</sub>).

Расходная часть баланса складывается из испарения (И) и подземного стока (С).

Испарение (И) включает расход воды за счет испарения с поверхности грунтовых вод и транспирации воды растительностью. Подземный сток (С) может быть представлен боковым оттоком (С<sub>1</sub>) и перетоком в нижележащий водоносный горизонт (С<sub>2</sub>).

Балансовое уравнение грунтовых вод для данного участка за время  $t$  имеет вид

$$\Delta W = A + K + П_1 + П_2 + П_3 - И - С_1 - С_2, \quad (6.3)$$

где  $\Delta W$  – изменение запасов грунтовых вод за время  $t$ .

Если на территории участка проводились режимные наблюдения за уровнем грунтовых вод, баланс грунтовых вод может быть выражен уравнением

$$\mu \Delta h = A + K + П - И - С, \quad (6.4)$$

где  $\Delta h$  – среднее изменение уровня за время  $t$ ;

$\mu$  – коэффициент водоотдачи (при  $\Delta h$  с минусом) и недостаток насыщения (при  $\Delta h$  с плюсом).

Величина  $\mu \Delta h$  изменяется по сезонам и в многолетнем цикле. Она может быть положительной при подъеме уровня грунтовых вод и отрицательной при его опускании.

На балансовом участке могут быть выражены не все составляющие. Так, например, при глубоком залегании грунтовых вод из балансового уравнения исключается испарение (И), а при отсутствии перетока воды через водоупор – члены  $С_2$  и  $П_3$ .

В условиях искусственного (нарушенного) режима подземных вод в балансовое уравнение грунтовых вод вводятся расходы на водоснабжение (В), расходы в дренажи (Д), фильтрация из оросительных каналов ( $\Phi_k$ ) и другие составляющие. Превышение прихода подземных вод над

расходом может вызвать подтопление территории, при обратном соотношении составляющих баланса – ее осушение. Изучая баланс крупной территории или любого другого участка, можно регулировать режим подземных вод в нужном направлении.

Для решения балансовых уравнений применяют экспериментальные и расчетные методы. В первом случае все основные статьи баланса подземных вод определяют непосредственным измерением, во втором – их рассчитывают на основе режимных наблюдений, используя уравнения неустановившегося движения в конечных разностях (метод Г.Н. Каменского) [9].

## 6.7. Запасы и ресурсы подземных вод

### 6.7.1. Классификация запасов подземных вод по гидрологическим условиям

*Запасы подземных вод* – это количество (объем) гравитационной воды, содержащейся в водоносных пластах, м<sup>3</sup>. Подземные воды, пригодные для использования в различных целях, относятся к ценнейшим полезным ископаемым. В отличие от твердых полезных ископаемых они могут находиться в движении и периодически возобновляться.

*Ресурсы подземных вод* – это количество подземных вод, поступающих в водоносные пласты в единицу времени (м<sup>3</sup>/сут) путем инфильтрации атмосферных осадков, фильтрации из рек, перетекания из водоносных горизонтов и т.д. Оценка запасов и ресурсов подземных вод имеет важнейшее значение для водоснабжения. Ни один водозабор не может быть построен и пущен в эксплуатацию без предварительного подсчета запасов подземных вод. Тип водозаборных сооружений, варианты их размещения, оптимальный режим работы и другие вопросы, связанные с использованием подземных вод для водоснабжения, решаются на основе подсчитанных запасов подземных вод.

В настоящее время большинство исследователей подразделяют запасы подземных вод на естественные и эксплуатационные.

*Естественные запасы* подземных вод – это объем гравитационной воды, который содержится в водоносных пластах в естественных условиях (в статическом состоянии или в движении). Естественные запасы состоят из статических, упругих и динамических запасов, т.е.:

$$Q_{\text{ест}} = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{упр}} + Q_{\text{дин.}} \quad (6.5)$$

*Статические и упругие запасы* (по Ф.М. Бочеву) характеризуют объем гравитационной воды в порах и трещинах водоносных пород в м<sup>3</sup>.

*Упругие запасы* – это количество воды, которое может быть извлечено из напорного водоносного пласта без его осушения за счет упругих свойств воды и горных пород при понижении уровня.

Под динамическими запасами или естественными ресурсами понимают расход подземных вод ( $\text{м}^3/\text{сут}$ ), протекающих через водоносный пласт. Динамические запасы в процессе круговорота воды на Земле постоянно возобновляются. Для их определения может быть использована известная формула Дарси:

$$Q_{\text{дин}} = k_{\text{ф}} h_{\text{ср}} B I, \quad (6.6)$$

где  $k_{\text{ф}}$  – коэффициент фильтрации пород,  $\text{м}/\text{сут}$ ;

$h$ ,  $B$  и  $I$  – соответственно, средняя мощность, ширина и уклон потока подземных вод.

Для вычисления динамических запасов используют также формулу с учетом величины модуля подземного стока:

$$Q_{\text{дин}} = \gamma F_{\text{н}}, \quad (6.7)$$

где  $\gamma$  – модуль подземного стока,  $\text{л}/\text{с}$ ;

$F_{\text{н}}$  – площадь области питания,  $\text{км}^2$ .

*Модуль подземного стока* характеризует количество воды, которое стекает в реку в единицу времени с единицы площади водоносного горизонта. Его величина для различных районов страны варьирует от десятых долей литра до 15 л/с и более с 1  $\text{км}^2$  площади водоносного горизонта.

*Эксплуатационные запасы подземных вод.* При эксплуатации водозаборов естественные условия подземных вод нарушаются. Формируется новый тип запасов – *эксплуатационные запасы*.

Под эксплуатационными запасами следует понимать количество подземных вод, которое может быть получено в единицу времени из водоносного горизонта рациональными в технико-экономическом отношении водозаборами без прогрессирующего снижения дебита и динамических уровней и ухудшения качества воды в течение всего расчетного срока водопотребления.

В районах действующих водозаборов уровень подземных вод снижается, образуются депрессионные воронки. В благоприятных гидрогеологических условиях это может вызвать привлечение в эксплуатируемый водоносный горизонт дополнительных источников питания. В этом случае эксплуатационные запасы по своей величине могут превосходить естественные запасы за счет дополнительных или привлекаемых запасов подземных вод.

По Ф.М. Бочеву, дополнительное питание водоносного пласта при действии водозаборов может происходить за счет поступления воды из соседних областей питания.

В формировании эксплуатационных запасов существенную роль могут играть и *искусственные запасы*. Они создаются путем инфильтрации воды с поверхности земли при устройстве искусственных сооруже-

ний (инфильтрационные бассейны, оросительные системы, поглощающие скважины и т.п.).

В целом условия формирования эксплуатационных запасов подземных вод в районах водозаборов выражают следующим балансовым уравнением:

$$Q_{\text{экс}} = Q_{\text{дин}} + Q_{\text{ст}}/T + Q_{\text{упр}}/T + Q_{\text{доп}} + Q_{\text{иск}}, \quad (6.8)$$

где  $Q_{\text{дин}}$ ,  $Q_{\text{ст}}$ ,  $Q_{\text{упр}}$  – используемые естественные (динамические, статические и упругие) запасы подземных вод;

$Q_{\text{доп}}$  – дополнительные или привлекаемые запасы в процессе эксплуатации;

$Q_{\text{иск}}$  – искусственные запасы;

$T$  – расчетный срок водопотребления.

Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод в районах водозаборов используют различные методы: гидродинамический, балансовый и др.

Оценить эксплуатационные запасы – это значит: определить дебит и понижение уровня подземных вод в период эксплуатации; рассчитать взаимодействие водозаборов; дать прогноз изменения качества подземных вод; обосновать наиболее рациональные в технико-экономическом отношении способы отбора воды.

### 6.7.2. Классификация эксплуатационных запасов подземных вод по степени изученности

В зависимости от степени изученности и детальности выполненных гидрогеологических работ эксплуатационные запасы подземных вод подразделяются на четыре категории: А, В, С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub>.

*Категория А* – запасы изучены и разведаны детально, полностью выяснены условия залегания и питания водоносных горизонтов, фильтрационные свойства пород, установлена связь с другими водоносными горизонтами и поверхностными водами, а также возможность пополнения эксплуатационных запасов. Эксплуатационные запасы подземных вод на участке проектируемого водозабора определены по данным опытно-эксплуатационных или опытных откачек.

*Категория В* – запасы подземных вод изучены с детальностью, обеспечивающей выяснение основных особенностей условий залегания, питания и связи с другими водоносными горизонтами и поверхностными водами. Эксплуатационные запасы определены по данным опытных откачек или по расчетной экстраполяции.

*Категория С<sub>1</sub>* – запасы разведаны и изучены в общих чертах. Эксплуатационные запасы определены по данным пробных откачек из еди-

ничных разведочных выработок, а также по аналогии с существующими водозаборами или примыкающими участками с категориями А и В.

*Категория С<sub>2</sub>* – запасы установлены на основании общих геолого-гидрогеологических данных, подтвержденных опробованием водоносного горизонта в отдельных точках, либо по аналогии с разведанными участками.

Для отнесения запасов к той или иной категории необходима также качественная оценка подземных вод. Качество вод оценивается в зависимости от их назначения. Наиболее жесткие требования в отношении качества предъявляются к запасам вод, оцениваемым по категориям А и В.

На базе утвержденных запасов по категориям А и В производится проектирование и выделение капитальных вложений на строительство новых и реконструкцию действующих водозаборов. В отдельных случаях, когда установление эксплуатационных запасов подземных вод по категории А экономически нецелесообразно из-за весьма сложных геолого-гидрогеологических условий, допускается проектирование и строительство водозаборов по категории В.

Выявленные запасы по категориям С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub> предназначаются для перспективного планирования использования подземных вод, обоснования бурения разведочных скважин на воду и т. п. Для перевода этих категорий в более высокую категорию В выполняют дополнительный объем гидрогеологических работ [9].

## 6.8. Охрана подземных вод от истощения и загрязнения

### 6.8.1. Истощение запасов подземных вод

Охрана подземных вод становится все более актуальной проблемой. В России охрана природных ресурсов, в том числе и охрана подземных вод от загрязнения и истощения, является одной из важнейших задач государства.

Использование, сохранение и воспроизводство природных ресурсов, включая и подземные воды, регламентируется и находится под контролем государственных организаций.

Основные мероприятия по охране подземных вод в настоящее время заключаются в предотвращении истощения подземных вод и охране подземных вод от загрязнения.

Под истощением запасов подземных вод следует понимать их сработку в процессе водоотбора без восполнения. Признаком истощения является прогрессирующее снижение динамических уровней эксплуатируемого водоносного горизонта, часто при постоянном расходе. В отличие от обычных процессов формирования депрессионной воронки падение уровней

при истощении запасов с течением времени не только не уменьшается, но нередко и увеличивается.

Сниженные уровни подземных вод после прекращения водоотбора не восстанавливаются в течение ряда лет.

Причина истощения запасов подземных вод заключается в чрезмерном отборе подземных вод крупными водозаборами в условиях недостаточной обеспеченности питанием эксплуатируемого водоносного горизонта.

Под влиянием длительной эксплуатации водозаборов подземных вод вокруг них образуются огромные депрессионные воронки, так называемые районные депрессии, с наибольшим понижением в центре.

Практически во всех крупных промышленных городах мира и во многих городах России (Москва, Санкт-Петербург, Курск и др.), где напорные воды длительное время эксплуатируются групповыми водозаборами, возникли значительные районные депрессии подземных вод с радиусами до 20 км и более. Так, например, усиление водоотбора подземных вод в Москве привело к формированию огромной районной депрессии с глубиной до 70–80 м, а в отдельных районах города до 110 м. Пьезометрический уровень подземных вод в среднем снижается до 3–5 м в год.

Истощению подземных вод способствует также неконтролируемый бесхозяйственный самоизлив артезианских вод из скважин, достигающий многих тысяч кубометров в сутки.

### **Меры борьбы с истощением запасов пресных подземных вод**

Для предотвращения истощения запасов предусматривают разнообразные меры, в том числе: регулирование режима водоотбора подземных вод; более рациональное размещение водозаборов по площади; введение кранового режима эксплуатации самоизливающих скважин и т.д.

В последние годы для предотвращения истощения подземных вод все чаще применяют искусственное пополнение их запасов. Этот метод, по мнению многих ученых, даже при интенсивном отборе подземных вод позволит более рационально использовать геологические ресурсы и осуществлять охрану подземных вод.

Сущность искусственного пополнения запасов заключается в переводе поверхностного стока в подземный. Пополнение осуществляется путем инфильтрации поверхностной (сырой) воды в водоносные пласты. Подземные воды получают при этом дополнительное питание, что позволяет увеличивать производительность водозаборов без истощения естественных запасов. При использовании этого метода можно частично (или полностью) отказаться от строительства специальных водоочистительных сооружений, так как «сырая» вода при инфильтрации через

толщу грунтов освобождается от бактериального загрязнения, становится более чистой и более высокого качества.

Общая схема работ по искусственному пополнению заключается в следующем. Вода из поверхностных источников (реки, озера, водохранилища) подается к инфильтрационным сооружениям, построенным в районе водозаборов. Из одних сооружений (бассейны, каналы и др.) «сырая» вода свободно инфильтруется, из других (скважины, колодцы) нагнетается в водоносные пласты, где смешивается с подземными водами. Водозабор из источников пополнения осуществляется с помощью скважин, шахтных колодцев и лучевых водозаборов.

Запасы пополняются искусственно не только на участках действующих водозаборов, но и в районах с ограниченными водными ресурсами для создания сезонных и многолетних емкостных запасов подземной воды – так называемое *магазинирование поверхностных вод*.

Возможность и целесообразность искусственного пополнения подземных вод определяются комплексом факторов (природных, технических, санитарных и др.), среди которых большое значение имеют геолого-гидрогеологические условия. Для успешного применения метода необходимо, чтобы в районе строительства имелся достаточно мощный (не менее 10–20 м), хорошо проницаемый ( $K_f$  не менее 3–5 м/сут) и фильтрационно-однородный (без слабопроницаемых прослоев) водоносный пласт. Зона аэрации должна иметь мощность не менее 5–8 м (лучше 10–15 м) и быть проницаемой для инфильтрации «сырой» воды.

При небольшой мощности зоны аэрации очистное и барьерное действие грунтов в отношении загрязненных поверхностных вод может оказаться недостаточным.

Наиболее благоприятны для размещения инфильтрационных сооружений долины рек, конуса выносов предгорных равнин, морские побережья, сложенные хорошо проницаемыми песчаными, песчано-гравийными и галечными отложениями. Вполне возможно и необходимо искусственное пополнение запасов подземных вод в суровых районах Крайнего Севера, где в зимний период промерзают как поверхностные, так и частично подземные источники воды. В этих районах целесообразно применение метода инфильтрации поверхностных вод через поглощающие скважины.

Инфильтрационные сооружения для пополнения запасов подземных вод созданы и успешно эксплуатируются во многих районах России.

### 6.8.2. Загрязнение подземных вод

Под *загрязнением подземных вод* понимают такие изменения их качества, которые приводят к превышению допустимых концентраций отдельных компонентов и общей минерализации воды и делают ее непригодной для использования.

Основными источниками загрязнения подземных вод являются бассейны бытовых и промышленных стоков, участки складирования отходов, загрязненные воды поверхностных водоемов, неисправная канализационная сеть, избыточное применение удобрений и ядохимикатов (рис. 6.11).

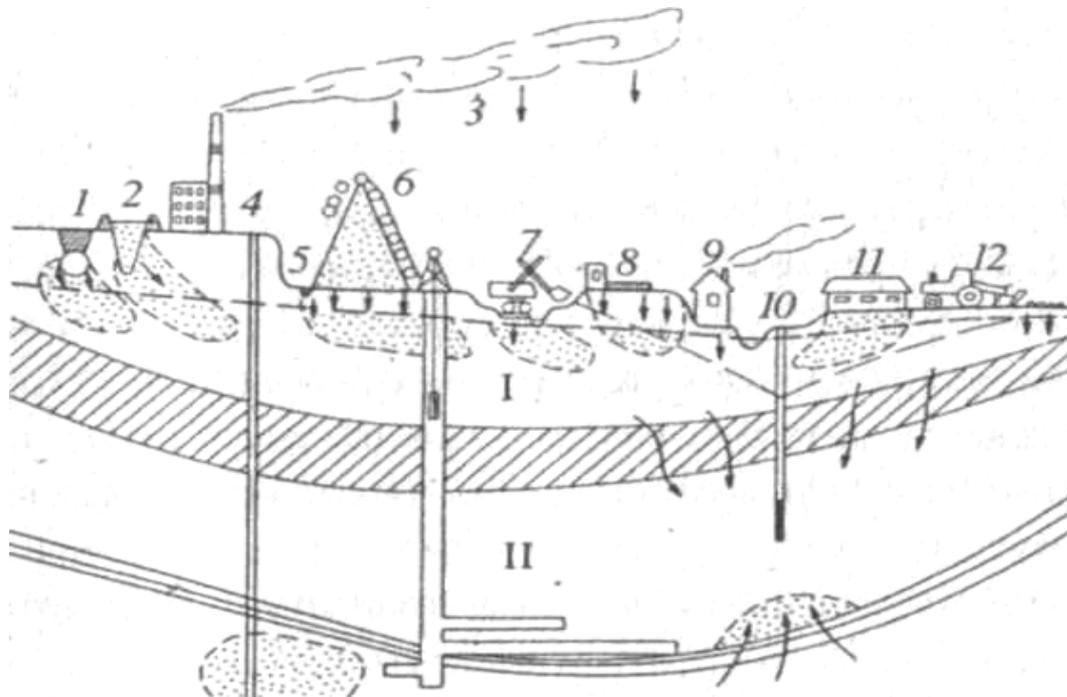


Рис. 6.11. Источники загрязнения подземных вод, по П.В. Гордееву и др.:  
 I – грунтовые воды; II – напорные пресные воды; III – напорные соленые воды;  
 1 – канализационные коллекторы; 2 – хвостохранилища; 3 – дымовые и газовые выбросы; 4 – подземное захоронение стоков; 5 – шахтные воды; 6 – терриконы;  
 7 – карьерные воды; 8 – заправочные станции; 9 – бытовое загрязнение;  
 10 – водозабор, подтягивающий соленые воды; 11 – объекты животноводства;  
 12 – внесение удобрений и пестицидов

К естественным источникам загрязнения относят сильно минерализованные подземные или морские воды, которые могут внедряться в продуктивный пресный водоносный горизонт при эксплуатации водозаборных сооружений (рис. 6.12).

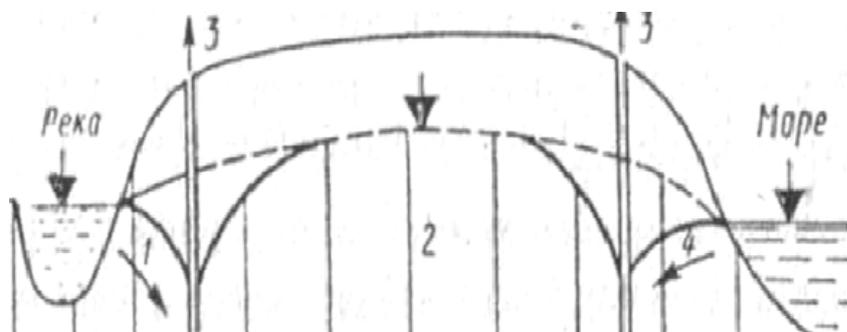


Рис. 6.12. Внедрение естественных источников загрязнения:  
 1 – загрязненные речные воды; 2 – пресный водоносный горизонт;  
 3 – водозаборы; 4 – соленые морские воды

Загрязненные растворы могут проникать к подземным водам различными путями: при фильтрации промышленных стоков из хранилищ и отстойников через зону аэрации, по затрубному пространству неисправных скважин, через поглощающие скважины, карстовые воронки, провалы и др.

Возможность загрязнения подземных вод во многом определяется геолого-гидрогеологическими условиями района, а именно: наличием или отсутствием перекрывающих слабопроницаемых пород, их фильтрационными и поглощающими (сорбционными) свойствами, глубиной залегания подземных вод и т.д.

Грунтовые воды и в особенности верховодка более всего подвержены загрязнению, так как они не защищены сверху толщей водоупорных пород от проникновения загрязняющих веществ. Артезианские воды загрязняются в значительно меньшей мере, преимущественно при сбросе сточных вод через систему поглощающих скважин.

При отсутствии водонепроницаемых покровных пород интенсивно загрязняются трещинные и карстовые воды. Очищающая способность трещиноватых и закарстованных пород значительно хуже, чем пород с высокой сорбционной емкостью (суглинки и пр.), поэтому в них загрязненные растворы распространяются на большие расстояния.

Наиболее часто встречается химическое и бактериальное загрязнение подземных вод. Значительно реже наблюдается радиоактивное, механическое и тепловое загрязнение.

*Химическое загрязнение* – наиболее распространенное, стойкое и далеко распространяющееся. Оно может быть органическим (фенолы, нефтяные кислоты, ядохимикаты и др.) и неорганическим (соли, кислоты, щелочи), токсичным (мышьяк, соли цинка, ртути, свинца и др.) и нетоксичным. Вредные химические вещества при фильтрации в пласте сорбируются частицами пород, окисляются и восстанавливаются, выпадают в осадок и т.д., однако, как правило, полного самоочищения загрязненных вод не происходит. Наибольшего распространения (до 10 км и более) очаг химического загрязнения достигает в сильно проницаемых грунтах и при значительных уклонах подземного потока, т.е. при хорошем оттоке подземных вод.

*Бактериальное загрязнение* выражается в появлении в подземных водах патогенных бактерий, вирусов (до 700 видов), простейших и др. Этот вид загрязнения носит временный характер. Его интенсивность зависит от величины начального загрязнения, водопроницаемости грунтов и времени выживания бактерий и вирусов.

Весьма опасно содержание в подземных водах, даже при очень малых концентрациях, *радиоактивных веществ*, вызывающих *радиоактивное загрязнение*. Наиболее вредны «долгоживущие» радиоактивные элементы, обладающие повышенной способностью к передвижению в подземных водах (стронций-90, уран, радий-226, цезий и др.). Радиоактивные

элементы могут проникать в подземные воды как в результате их взаимодействия с радиоактивными горными породами, так и при выпадении на поверхности земли радиоактивных продуктов и отходов.

*Механическое загрязнение* характеризуется попаданием в подземные воды механических примесей, содержащихся в сточных водах (песок, шлак и др.), преимущественно по крупным трещинам и пустотам. Механические примеси могут значительно ухудшать органолептические показатели подземных вод.

*Тепловое загрязнение* связано с повышением температуры подземных вод в результате их смешивания с более нагретыми поверхностными, технологическими сточными водами.

*Меры борьбы с загрязнением подземных вод.* Для предотвращения загрязнения подземных вод разрабатывают инженерные мероприятия, включающие очистку сточных вод, создание безотходных производств, экранирование чаш бассейнов, перехват профильтровавшихся стоков дренажем и др. Особо токсичные сточные воды закачивают через скважины в глубокие водоносные горизонты, в массивы каменной соли и др. Однако этот метод не совершенный, т.е. возможно проникновение загрязненных вод в вышележащие водоносные горизонты через каверны в обсадных трубах и по затрубным пространствам нагнетательных скважин.

При выборе мест заложения водозаборов последние должны располагаться выше по потоку подземных вод относительно возможных участков загрязнения. Водозаборы не следует размещать близко к реке или к морю во избежание подтока загрязненных речных или соленых морских вод. Не рекомендуется размещать водозаборы вблизи промышленных предприятий и сельскохозяйственных территорий со значительными утечками сточных вод.

Важнейшей мерой предупреждения загрязнения вод в районе водозаборов является устройство вокруг них зон санитарной охраны [9].

### 6.8.3. Зоны санитарной охраны (ЗСО)

*Зоны санитарной охраны (ЗСО)*, т.е. территории с особым режимом, исключающие возможность загрязнения и ухудшения качества подземных вод, устанавливают вокруг всех водозаборов, эксплуатирующих подземные воды для питьевого водоснабжения. Согласно санитарным правилам и нормам (СанПиН 2.1.4.1110–02), они должны включать три пояса охраны.

*Первый пояс*, или *зона строгого режима*, включает участок, непосредственно примыкающий к водозабору. Граница зоны проходит на расстоянии не менее 30 м от водоприемных сооружений при эксплуатации артезианских вод и не менее 50 м – при эксплуатации грунтовых вод. На территории зоны строгого режима запрещаются, в частности, все виды строительства, размещение хозяйственно-бытовых зданий, закладка карьеров

для добычи песка, бурение скважин, проходка шурфов и других выработок, не связанных с эксплуатацией водозабора. Территория первого пояса ЗСО должна быть ограждена и обеспечена охраной.

*Второй и третий пояса, или зоны ограничений, охватывают территории, на которых ограничивается производственная и хозяйственная деятельность человека для защиты эксплуатируемого водоносного горизонта от загрязнения.*

*Второй пояс ЗСО предназначен для защиты водоносного пласта от микробных (бактериальных) загрязнений. Граница этого пояса определяется гидродинамическими расчетами, исходя из условий, что микробное загрязнение не достигает водозабора. Запрещается размещение кладбищ, скотомогильников, силосных траншей, животноводческих и птицеводческих предприятий и других объектов, которые могут создавать угрозу микробного загрязнения. Кроме того, ограничиваются земляные, строительные и другие работы. Особенно строгие меры ограничения вводят при охране водозаборов, эксплуатирующих недостаточно защищенные подземные грунтовые, а также напорные и безнапорные межпластовые воды, имеющие непосредственную гидравлическую связь с открытыми водоемами.*

*Третий пояс ЗСО защищает эксплуатируемый водоносный пласт от химического загрязнения. Его границы также определяются гидродинамическими расчетами. Расчеты должны подтвердить, что время продвижения химических загрязнений будет больше расчетного срока службы водозабора (обычный срок эксплуатации водозабора 25-50 лет).*

На территории третьего пояса ЗСО запрещается размещение складов горюче-смазочных материалов, ядохимикатов и минеральных удобрений, шламохранилищ и других объектов, которые могут вызвать химическое загрязнение подземных вод.

Любое новое строительство на территории второго и третьего поясов ЗСО возможно лишь при обязательном согласовании с центром государственного санитарно-эпидемиологического надзора. Соблюдение указанных выше санитарных правил обязательно для граждан, индивидуальных предпринимателей и юридических лиц [9].

### **Вопросы для самопроверки**

1. Как называют воды, находящиеся в верхней части земной коры и залегающие ниже поверхности земли?
2. Как отличается качество подземных вод от качества вод поверхностных?
3. Какие показатели качества питьевой воды Вы знаете?
4. Как называют подземные воды, которые имеют повышенное содержание биологически активных микрокомпонентов, газов, радиоактивных элементов?

5. Какую температуру имеют так называемые термальные воды?
6. По каким характеристикам подземные воды подразделяют на два типа – безнапорные и напорные?
7. Какие воды заключены между водонепроницаемыми слоями – кровлей и подошвой?
8. Как называют воды первого от поверхности сплошного водоносного горизонта?
9. Как называют линзообразные скопления воды на водоупорах или слабопроницаемых грунтах, имеющие локальное распространение?
10. Как называют линии, соединяющие точки с одинаковыми абсолютными или относительными отметками уровней грунтовых вод?
11. Как называют естественный выход подземных вод на земную поверхность?
12. Нисходящие источники образуются при естественном выходе на дневную поверхность безнапорных вод. Как подходит подземная вода к нисходящему источнику: сверху вниз или снизу вверх?
13. Восходящие источники образуются при выходе на поверхность напорных или безнапорных вод?
14. Что следует понимать под эксплуатационными запасами подземных вод?
15. Какие запасы подземных вод создаются путем инфильтрации воды с поверхности земли при устройстве искусственных сооружений (инфильтрационные бассейны, оросительные системы, поглощающие скважины)?
16. Какие задачи ставит охрана природных ресурсов в России?
17. Какие меры борьбы с истощением запасов пресных подземных вод Вам известны?
18. Какие изменения качества подземных вод понимают под их загрязнением?
19. Каковы меры борьбы с загрязнением подземных вод?
20. Как проходят границы первого пояса или зоны строгого режима зоны санитарной охраны водозабора подземных вод?
21. Какие ограничения действуют во втором и третьем поясе зоны санитарной охраны водозабора подземных вод?

## 7. ГИДРОЛОГИЯ БОЛОТ

### 7.1. Происхождение болот

*Болото*, в широком смысле слова – это избыточно увлажненный с застойным водным режимом участок земли, на котором происходит накопление вещества в виде неразложившихся растительных остатков.

Болота возникают путем заболачивания суши (главный вид образования болот) и путем зарастания (заболачивания) водоемов.

Заболачивание суши свойственно многим природным зонам земного шара. Оно происходит при избыточном увлажнении и благоприятных геоморфологических условиях (понижения, впадины и др.), создающих предпосылки для застойного водного режима, накопления органического вещества и образования болот. Можно выделить два основных вида заболачивания суши: затопление и подтопление территории.

*Затопление* территории может быть обусловлено двумя причинами. Во-первых, преобладанием осадков над испарением при отсутствии хорошего дренажа. Так образуются болота в тропических лесах, в тундре. Очень часто в условиях избыточного или даже умеренного увлажнения болота возникают на плоских водораздельных пространствах при слабом оттоке вод. Во-вторых, затоплением территории поверхностными водами (водами рек, озер, морей) в условиях пониженного рельефа прилегающей местности. Так образуются болота на берегах рек и озер. Такого же происхождения болота на берегах приливных морей.

*Подтопление* территории обычно связано с повышением уровня грунтовых вод, вызванного какими-либо искусственными мероприятиями: сооружением водохранилищ, избыточным орошением, сооружением нарушающих естественный сток грунтовых вод насыпей железных или шоссе-сех дорог и т.д.

Зарастание или заболачивание водоемов свойственно в основном условиям умеренного климата. Оно обычно начинается с берегов. На дне водоема отлагаются глинистые частички, оседают остатки водных организмов (планктона и бентоса), постепенно превращающиеся в органический ил – сапрпель. Водоем мелеет, в нем поселяются высшие растения: сначала погруженные (рдест, роголистник), затем кувшинки с плавающими листьями, а позже тростник камыш, рогоз. Неполное разложение растительных остатков приводит к образованию торфа. От водоема остаются небольшие «окна» воды, затем и они зарастают. Постепенно водоем превращается в болото. Часто описанный процесс сопровождается образованием на поверхности водоема зыбкого ковра («зыбун», «сплавина», «плаур») из корневищ растений. В таком случае зарастание водоема идет со всех сторон – со дна, с берегов и с поверхности.

Болота распространены на Земле повсеместно: в разных климатических зонах и на большинстве континентов. Общая площадь торфяных болот на земном шаре, по данным ГГИ, около 2,7 млн км<sup>2</sup>, или около 2 % площади суши. В них сосредоточено более 11 тыс. км<sup>3</sup> воды, или 0,03 % пресных вод гидросферы. Общая площадь болот всех типов на Земле, по данным Н.Я. Каца, еще больше – до 3,5 млн км<sup>3</sup>.

В России общая площадь торфяных болот составляет 0,6 млн км<sup>2</sup>, а с учетом заболоченных земель общая площадь всех болот равна 1 млн км<sup>3</sup> (37 % площади болот мира и 5,9 % территории страны).

## 7.2. Типы болот

Следуя Н.Я. Кацу, будем подразделять все болота на две большие группы – *заболоченные земли* (не имеющие хорошо выраженного слоя торфа) и собственно *торфяные болота*. К заболоченным землям можно отнести многие типы болот: травяные болота арктической тундры, тростниковые и осоковые болота лесостепи, засоленные болота полупустыни и пустыни (солончаки), заболоченные тропические леса, пресноводные тропические травяные болота сезонного увлажнения, пресноводные и солоноватоводные приморские болота (марши), соленые мангровые болота и т.д.

По комплексу геоморфологических, гидрологических и геоботанических признаков торфяные болота, лучше изученные и приуроченные в основном к тундре, лесной зоне и лесостепи, подразделяются, в свою очередь, на три типа: низинные, переходные и верховые (рис. 7.1).

*Низинные болота* обычно имеют вогнутую или плоскую поверхность, способствующую застою воды. Образуются они в низких местах – по берегам рек и озер. В последнее время такие болота стали появляться в зонах подтопления водохранилищами.

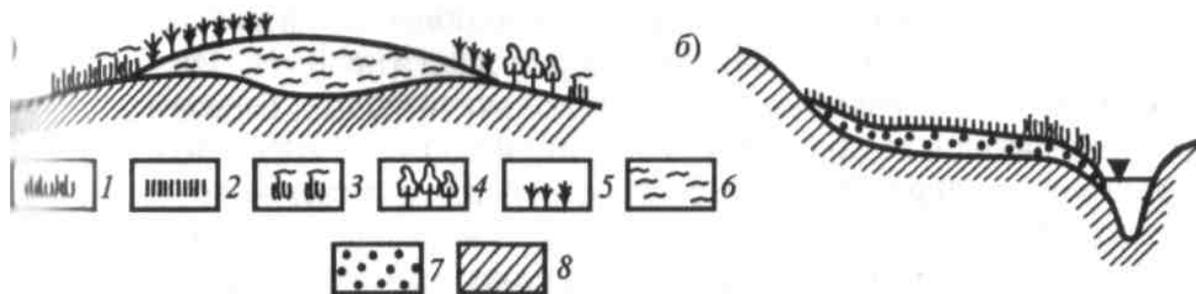


Рис. 7.1. Схема верхового (а) и низинного (б) торфяных болот: микроландшафты: 1 – осоковые, осоково-тростниковые, осоково-гипновые; 2 – сфагново-осоковые; 3 – сфагново-пушицевые; 4 – ольшаники; 5 – сосново-сфагновые; 6 – залежь сфагнового торфа; 7 – залежь тростникового и осокового торфа; 8 – минеральный грунт

К низинным болотам относятся также пойменные и притеррасные болота, болота в низовьях и дельтах рек (так называемые «плавни» с густыми зарослями тростника).

Важнейшие гидрологические особенности низинных болот – наличие близлежащего водоема или водотока, неглубокое положение уровня грунтовых вод, преобладание в водном питании поверхностных и грунтовых вод – поставщиков минеральных биогенных веществ.

Характерной чертой низинных болот являются *евтрофные* растения, требовательные к минеральным веществам. Среди таких растений – ольха, береза (иногда ель), осоки, тростник, рогоз.

*Верховые болота* имеют мощный слой торфа и выпуклую поверхность. Отличительная черта гидрологического режима верховых болот – преобладание в их водном питании атмосферных осадков, бедных минеральными биогенными веществами. Для верховых болот характерны *олиготрофные* растения, нетребовательные к минеральным веществам: сосна, вереск, пушица, сфагновые мхи. Образуются верховые болота обычно на водоразделах, а также в других местах в результате эволюции низинных болот.

Верховые болота подразделяют на два подтипа – лесные, покрытые ковром сфагнового мха и сосной, а восточнее Енисея – лиственницей, и грядово-мочажинные, имеющие длинные гряды с кочками торфа и понижения – мочажины, покрытые сфагновым мхом и заросшие травянистой растительностью.

Промежуточное положение занимают переходные болота с плоской или слабовыпуклой поверхностью и мезотрофной растительностью (умеренного минерального питания). Наиболее типичные растения таких болот – береза (иногда сосна), осоки, сфагновые мхи.

Для каждого из трех типов торфяных болот характерны определенные сочетания видов растительности (биоценозов) в совокупности с геоморфологическими особенностями отдельных частей болот, создающие специфические болотные микроландшафты. Так, весьма типичными микроландшафтами (по К.И. Иванову) для низинных болот являются древесные (ольшаниковые, березовые и др.), древесно-осоковые, древесно-осоково-сфагновые, тростниковые, тростниково-осоковые и другие, для переходных болот – древесно-осоковые, сфагново-осоковые и другие, для верховых – сосново-кустарничковые, сосново-сфагновые, сфагново-пушицевые и др. Свообразными болотными микроландшафтами являются комплексные грядово-мочажинные микроландшафты с различным характером растительности в зависимости от типа болот, а также грядово-озерковые, озерково-мочажинные микроландшафты и др.

### 7.3. Морфология и гидрология болот

Сформировавшееся верховое торфяное болото обычно имеет многослойное строение (рис. 7.2, а), отражающее процесс постепенного накопления торфа и повышения поверхности болота. Каждый слой имеет специфический состав торфа, показывающий изменение видового состава растительности на разных фазах развития болота. Вся толща торфа в болоте называется *торфяной залежью*. В пределах торфяной залежи выделяют инертный и деятельный слой, уровень грунтовых вод (рис. 7.2, б).

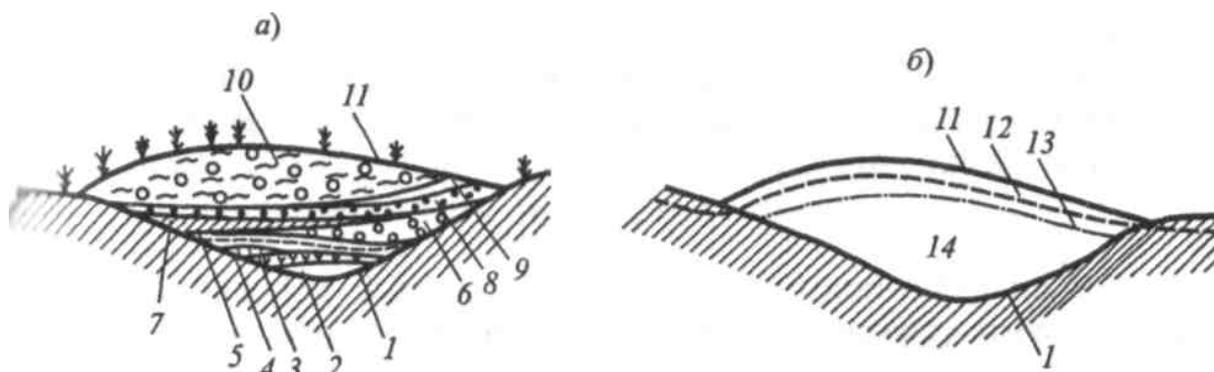


Рис. 7.2. Схема слоистого строения торфяной залежи (а) и деятельного и инертного слоев (б) верхового болота:

- 1 – минеральное дно; 2 – сапрпель; 3 – тростниковый торф;
- 4 – хвощевый торф; 5 – осоковый торф; 6 – лесной торф; 7 – гипновый торф;
- 8 – шейхцериево-сфагновый торф; 9 – пушицево-сфагновый торф;
- 10 – сфагновый торф с пнями сосны; 11 – поверхность болота; 12 – уровень грунтовых вод; 13 – нижний горизонт деятельного слоя; 14 – инертный слой

Инертный слой лежит на минеральном дне и составляет основную толщу торфяной залежи. Он имеет очень слабый водообмен с вышерасположенными слоями торфа и с окружающими болота землями, отличается постоянным или малоизменяющимся содержанием воды в торфе. Инертный слой отличают также малая водопроницаемость, отсутствие доступа кислорода в поры торфа, отсутствие аэробных бактерий и микроорганизмов. Толщина инертного слоя изменяется от нуля у границ болота до максимальных глубин торфяных отложений (иногда до 18–20 м).

В пределах деятельного (или активного) слоя, лежащего над инертным слоем, происходит некоторый влагообмен торфяной залежи с атмосферой и окружающими болото территориями, изменяется содержание влаги в торфе, происходят колебания уровня грунтовых вод. Деятельный слой отличают также повышенные водопроницаемость и водоотдача, периодическое поступление воздуха в поры торфа, освобождающиеся от воды при снижении уровня грунтовых вод, большое количество аэробных бактерий и микроорганизмов, способствующих разложению части отмирающего растительного покрова и превращению его в торф,

наличие в верхней части живого растительного покрова. Нижний горизонт деятельного слоя приблизительно соответствует среднему многолетнему минимальному уровню болотных грунтовых вод.

Толщина деятельного слоя – от 40 (мохово-травянистые части болот) до 80–95 см (лесные низинные болота); она больше на повышенных и меньше на пониженных элементах рельефа болота.

Содержание воды в инертном слое торфяной залежи, т.е. ниже уровня грунтовых вод, обычно весьма велико – от 91 до 97 % (по объему). Выше уровня грунтовых вод в деятельном слое содержание воды существенно меньше. Во всей торфяной залежи содержание воды увеличивается или уменьшается в зависимости от повышения или понижения уровня грунтовых вод.

Зимой деятельный слой болота в условиях холодного и умеренного климата обычно промерзает и водоотдача болота резко уменьшается.

Поверхность болота, как уже отмечалось, может быть вогнутая, плоская или выпуклая. Характерными элементами рельефа болота служат: положительные – гряды, кочки, бугры; отрицательные – мочажины, межкочечные и межбугровые понижения.

*Гряды* – это отдельные вытянутые в длину повышенные участки болота, отделенные друг от друга вытянутыми, сильно обводненными понижениями – *мочажинами*. Гряды и мочажины обычно вытянуты вдоль горизонталей и располагаются концентрически вокруг наиболее высоких точек болота. *Бугры* сложены торфом и обычно связаны с явлением морозного выпучивания в условиях лесотундры; высота бугров до нескольких метров. *Кочки* также состоят из торфа и связаны с неравномерным распределением растительного покрова и накопления торфа.

Болота имеют специфическую гидрографическую сеть, включающую болотные водоемы, болотные водотоки и топи.

К *болотным водоемам* относятся болотные озера и озерки. *Болотные озера* – это относительно крупные водоемы (площадью до 10 км<sup>2</sup> и глубинами до 10 м), имеющие торфяные берега, иногда плавающие моховые сплавины. *Озерки* – водоемы меньших размеров; они обычно приурочены к местам перегибов поверхности болота и, как правило, располагаются большими группами, включающими десятки, а иногда и сотни озерков. Водоемы в болотах по своему происхождению бывают первичными, сохранившимися остатками тех водоемов, которые существовали еще до начала формирования болота, и вторичными, возникшими уже в процессе заболачивания суши или эволюции болота.

*Болотные водотоки* (речки и ручьи) представлены как заторфованными и зарастающими первичными водотоками, существовавшими еще до образования болота, так и вторичными водотоками, сформировавшимися в процессе болотообразования. И те, и другие водотоки способствуют

дренажу болот. Течение воды во вторичных водотоках обычно очень медленное, а расходы воды в них небольшие. Своеобразные водные объекты болот – *топи*, т.е. сильно переувлажненные участки с разжиженной торфяной залежью. Здесь практически отсутствует деятельный слой, и уровень грунтовых вод стоит выше поверхности торфа.

#### 7.4. Влияние болот на речной сток. Хозяйственное значение болот

Единой точки зрения относительно гидрологического значения болот и в особенности их «регулирующей» роли у гидрологов долгое время не было. Одни считали, что болота увеличивают весенний сток, другие – уменьшают. Подобные противоречивые точки зрения имелись и в оценке влияния болот на меженный сток. Усилиями в основном советских гидрологов (К.Е. Иванов, И.А. Шикломанов и др.) к настоящему времени сложились следующие представления о гидрологической роли болот.

Вследствие повышенного испарения и транспирации с поверхности болота уменьшают среднюю величину стока: с заболоченных территорий в реки поступает меньше стока, чем с сопредельных незаболоченных земель. Различие в испарении с поверхности болот и незаболоченных земель растет с уменьшением общей увлажненности территории.

В тундре испарение с болот и незаболоченных земель в условиях избыточного увлажнения мало отличается. Различие возрастает в лесной зоне в условиях достаточного увлажнения и достигает наибольшего значения в степной, полупустынной и пустынной зонах (в условиях недостаточного увлажнения), где с заболоченных земель теряется на испарение значительно больше воды, чем с сопредельных сухих территорий. Так, огромные массы воды теряются на так называемое непродуктивное испарение с заболоченных пойм и дельт («плавней») в южных районах России. Непродуктивное испарение – это потери воды с открытой водной поверхности и при *транспирации* болотной, «некультурной», т.е. не сельскохозяйственной растительностью.

Таким образом, непосредственным следствием осушения болот должно стать уменьшение испарения и увеличение стока, причем тем большее, чем южнее расположен осушенный болотный массив. В зоне достаточного увлажнения дополнительной причиной увеличения среднего стока непосредственно в результате осушения болот служит сработка статических (вековых) запасов подземных вод, сопутствующая снижению уровня грунтовых вод после осушения. Однако впоследствии испарение с осушенных массивов может возрасти и тем сильнее, чем больше будет транспирировать культурная растительность, посаженная на осушенных землях. Величина стока тогда может выровняться или

даже уменьшиться по сравнению с его величиной до осушения. Влияние болот на сезонный сток менее однозначно. Часто считают, что болота, поглощая влагу во время снеготаяния, уменьшают весенний сток, и поэтому осушение болот, улучшая отток талых вод, должно привести к увеличению весеннего стока. Однако необходимо учитывать и противоположную тенденцию: осушенные болота могут иметь лучшую аэрацию грунта, что приводит к увеличению потерь талых вод на инфильтрацию и испарение и к уменьшению весеннего стока. Поэтому осушение болот, как отмечает Н.А. Шикломанов, в одних случаях ведет к *увеличению*, а в других – к *уменьшению* весеннего стока.

Установлено, что болота в целом не способствуют увеличению меженного стока, как иногда считали раньше. Объясняется это тем, что летом болота испаряют много воды и дают мало поверхностного стока. Кроме того, водоотдача торфа очень низкая, что также не способствует меженному стоку. Зимой болота вообще могут не давать стока в связи с промерзанием деятельного слоя. Поэтому осушение болот, как правило, выравнивает колебания стока в течение года, иногда существенно увеличивая (по данным Н.А. Шикломанова, в 1,5–2 раза) минимальные расходы воды в меженный период.

Неоднозначные оценки влияния осушения болот на меженный сток иногда возникают также из-за того, что наблюдениями охватывают речные бассейны разного размера и с разной глубиной эрозионного вреза. На малых водосборах с глубиной осушительного дренажа, соизмеримого с глубиной эрозионного вреза, меженный сток вследствие снижения уровня грунтовых вод после осушения болот может уменьшиться. Но ниже по течению с увеличением площади водосбора и глубины эрозионного вреза меженный сток после осушения болот обычно не только сохраняется прежним, но может и увеличиться.

Важную роль играют болота в формировании химического состава речных вод. Реки, берущие начало из верховых болот, питающихся атмосферными осадками, имеют воды гидрокарбонатного класса. Они содержат очень мало минеральных веществ, но зато обогащены органическими веществами. В ряде случаев качество вытекающих из болот вод невысокое (они перенасыщены органикой, продуктами разложения органических веществ, часто имеют характерные «болотный» запах и цвет). Вытекающие из крупных болот воды часто неблагоприятны для развития высших водных организмов. Осушение болот должно поэтому способствовать улучшению качества речной воды.

Таким образом, для крупных регионов осушение болот в целом не должно оказывать на речной сток отрицательного влияния. Однако факт перехода в результате осушения части подземного стока в поверхностный, в особенности на малых водосборах, должен обязательно учиты-

ваться при осушительных мелиорациях (при определении, например, густоты и глубины искусственного дренажа). Чрезмерное осушение болот может нанести ущерб малым водотокам.

Болота имеют большое хозяйственное значение. Добываемый после осушения болот торф широко используют как топливо (ряд ГРЭС в нашей стране работает на торфе), как удобрение (в особенности торф низинных болот) и химическое сырье (из торфа вырабатывают ряд химических продуктов – аммиак, деготь и др.); идет торф и на подстилку скоту.

Первые сведения о торфе как «горючей земле» для нагревания пищи приводятся Плинием Старшим (начало нашей эры). В XII–XIII вв. торф как топливный материал был известен в Голландии и Шотландии. В XVI–XVII вв. из торфа выжигали кокс, получали смолу. В XX в. торф стали использовать в энергетике и для получения газа.

Промышленное скопление торфа называют торфяным месторождением. На земном шаре промышленное значение имеет торф на площади около 100 млн га, причем около  $\frac{3}{4}$  этой площади приходится на долю России. Наибольшее промышленное значение имеют торфяники в Западной Сибири. Общие промышленные запасы торфа в России оцениваются не менее чем в 150 млрд т. Из зарубежных стран наибольшие промышленные запасы торфа имеют Канада, Финляндия и США. Годовая добыча торфа в бывшем СССР составляла около 100 млн т. Для промышленной добычи торфа используются специальные фрезерные и экскаваторные машины.

На осушенных болотах выращивают травы, овощи, зерновые технические культуры, цитрусовые (в Колхиде) и др.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Как называют избыточно увлажненный с застойным водным режимом участок земли, на котором происходит накопление вещества в виде неразложившихся растительных остатков?
2. Какие причины приводят к образованию болот?
3. Как называют процесс, связанный с повышением уровня грунтовых вод, вызванным какими-либо искусственными мероприятиями: сооружением водохранилищ, избыточным орошением, сооружением нарушающих естественный сток грунтовых вод насыпей железных или шоссейных дорог и т.д.?
4. Отличительная черта гидрологического режима каких болот (верховых или низовых) – преобладание в их водном питании атмосферных осадков, бедных минеральными биогенными веществами?
5. Какие болота обычно имеют вогнутую или плоскую поверхность, способствующую застойному характеру водного режима?

6. Важнейшими гидрологическими особенностями каких болот являются наличие близлежащего водоема или водотока, неглубокое положение уровня грунтовых вод, преобладание в водном питании поверхностных и грунтовых вод – поставщиков минеральных биогенных веществ?

7. Что называют мочажинами?

8. Каковы положительные последствия осушения болот?

9. Каковы отрицательные последствия осушения болот?

10. Какими показателями характеризуется качество воды в реках, берущих начало в болотах?

## 8. ГИДРОЛОГИЯ МОРЕЙ

### 8.1. Мировой океан и его структура

Под Мировым океаном понимают океаны Земли. *Океаном* считают водную массу, которая большей своей частью окружена сушей. Одни источники делили Мировой океан на четыре части, другие на пять, пока в 2000 году Международная гидрографическая организация не приняла разделение на пять океанов: *Тихий, Атлантический, Индийский, Северный Ледовитый и Южный (Антарктический)*.

Термин «Южный океан» многократно появлялся еще в XVIII веке, когда началось систематическое исследование Антарктиды. В публикациях Международной гидрографической организации Южный океан из состава Атлантического, Индийского и Тихого был выделен в 1937 году. Этому было свое обоснование: в южной своей части границы между тремя океанами весьма условны, в то же время воды, прилегающие к Антарктиде, имеют свою специфику, а также объединены Антарктическим циркумполярным течением.

Океаны подразделяются на **моря** – части океана, вдающиеся в сушу или отделенные от других его частей островами, полуостровами или частями берегов материков.

**Тихий океан** – самый большой и самый глубокий океан Земли. Его *площадь* составляет 178,6 млн км<sup>2</sup>. *Расположение*: ограничен восточным побережьем Евразии и Австралии, западным побережьем Северной и Южной Америки, Северным Ледовитым океаном на севере, Южным океаном на юге.

Он может свободно вместить все материки и острова вместе взятые, поэтому его иногда называют Великим. Название же «Тихий» связано с именем Ф. Магеллана, совершавшего кругосветное путешествие и проплывавшего через Тихий океан при благоприятных погодных условиях. Он занимает 1/3 поверхности всей планеты и почти 1/2 площади Мирового океана.

Океан имеет овальные очертания, особенно он широк у экватора. Тихий океан самый глубокий. Средняя *глубина* его составляет 3980 метров (по другим источникам – 4282 м), а максимальная достигает 11022 м в Марианском желобе.

Побережье океана находится в сейсмической зоне, так как это граница литосферной плиты и место взаимодействия с другими литосферными плитами. Это взаимодействие сопровождается наземными и подводными землетрясениями и извержениями вулканов.

Характерная особенность рельефа дна океана – приуроченность наибольших глубин к его окраинам. Глубоководные впадины тянутся в виде

узких длинных желобов в западной и восточной частях океана. Крупные поднятия разделяют ложе океана на котловины. На востоке океана расположено Восточно-Тихоокеанское поднятие, которое входит в систему срединно-океанических хребтов.

В настоящее время Тихий океан играет важную роль в жизни многих стран. Половина мирового улова рыбы приходится на эту акваторию, значительную его часть составляют различные моллюски, крабы, креветки, криль. В некоторых странах на морском дне выращивают моллюсков, различные водоросли и используют их в пищу. На шельфе ведут разработку россыпей металлов, у берегов полуострова Калифорния добывают нефть. Некоторые страны опресняют морскую воду и используют ее. Через Тихий океан проходят важные морские пути, протяженность этих трасс очень велика. Хорошо развито судоходство, главным образом вдоль побережья материков.

Хозяйственная деятельность человека привела к загрязнению вод океана и к истреблению некоторых видов животных. Так, в XVIII веке были истреблены морские коровы, открытые одним из участников экспедиции В. Беринга. На грани истребления находятся котики, киты. В настоящее время их промысел ограничен. Большую опасность для океана представляет загрязнение вод нефтью, отходами промышленности.

**Атлантический океан** занимает площадь в 92 млн км<sup>2</sup>. Он собирает пресные воды с самой значительной части суши и выделяется среди других океанов тем, что обе полярные области Земли соединяет в виде широкого пролива. В центре Атлантики проходит Срединно-Атлантический хребет. Это пояс неустойчивости земной коры. Отдельные вершины этого хребта поднимаются над водой в виде вулканических островов. Самый крупный из таких островов – Исландия. Средняя глубина океана меньше, чем Тихого и Индийского, максимальная глубина достигает 8742 м (впадина Пуэрто-Рико).

**Индийский океан** менее обширен, чем Тихий и Атлантический океаны. Его площадь составляет 76 млн км<sup>2</sup>. Наиболее широк этот океан в Южном полушарии, а в Северном имеет вид крупного моря, глубоко врезающегося в сушу. Именно крупным морем представлялся Индийский океан людям с древних времен Птолемея вплоть до эпохи Великих географических открытий. Расположение: Индийский океан с севера ограничен Евразией, с запада – восточным побережьем Африки, с востока – западным побережьем Океании и Австралии, с юга – водами Южного моря, граница Атлантического и Индийского океанов проходит по 20°-му меридиану восточной долготы, между Индийским и Тихим океаном – по 147-му меридиану. Средняя глубина: 3967 м. Наибольшая глубина: 7729 м (Зондский, или Яванский, желоб).

**Северный Ледовитый океан** – наименьший из океанов Земли. Его площадь почти 15 млн км<sup>2</sup>. Океан расположен в Арктике и занимает обширные пространства вокруг Северного полюса. Максимальная глубина океана составляет 5527 метров. Характерная особенность рельефа – большой шельф, ширина которого достигает порой 1300–1500 км. Центральная часть пересечена горными хребтами и глубокими разломами, между которыми лежит котловина. Расположение: между Евразией и Северной Америкой.

**Южный океан (или Антарктический океан)** – четвертый по размеру океан Земли, окружающий Антарктиду. Площадь 20327 тыс. кв. км (если принять северной границей океана 60-й градус южной широты). Наибольшая глубина (Южно-Сандвичев желоб) – 8428 м.

*Море* – часть Мирового океана, обособленная сушей или возвышениями подводного рельефа. Некоторые моря являются частью другого моря (например, Эгейское море – часть Средиземного). По степени обособленности и особенностям гидрологического режима моря подразделяются на 3 группы: *внутренние моря* (средиземные моря и полузамкнутые моря), *окраинные моря* и *межостровные моря*. По своему географическому положению средиземные моря иногда делят на межматериковые моря и внутриматериковые моря.

С геологической точки зрения современные моря являются молодыми образованиями: все они определились в очертаниях, близких к современным, в палеоген-неогеновое время и окончательно оформились в антропогене. Наиболее глубокие моря образовались в местах крупных разломов земной коры (например, Средиземное море). Мелкие моря возникли при затоплении водами Мирового океана окраинных частей материков при их опускании или при повышении уровня океана и располагаются обычно на материковой отмели.

В океанах и морях выделяют также их отдельные части и районы, отличающиеся очертаниями, морфологией дна и гидрологическими режимами.

*Залив* – часть океана, моря или озера, глубоко вдающаяся в сушу, но имеющая свободный водообмен с основной частью водоема. Среди заливов различаются: бухта, губа, эстуарий, фьорд, лиман, лагуна, гавань и др.

Гидрологические и гидрохимические условия залива тождественны с условиями водоема, частью которого он является. В отдельных случаях местные особенности климата и материковый сток могут придавать гидрологическим характеристикам поверхностного слоя заливов некоторые специфические черты.

К наиболее крупным заливам Мирового океана относятся заливы: Аляскинский, Бенгальский, Бискайский, Большой Австралийский, Гвинейский.

В ряде случаев название «залив» закрепилось за акваториями, которые по своему гидрологическому режиму являются морями (например, Мексиканский, Гудзонов, Персидский, Калифорнийский). Также к популярным заливам относятся Венецианская лагуна, Гейнрангер фьорд в Норвегии, Балаклавская бухта, Днестровский лиман в устье реки Днестр.

*Бухта* (нем. *Bucht*) – небольшая часть моря, залива, озера, водохранилища, обособленная от открытых вод частями суши (выступами берегов, скалами и близлежащими островами) и защищенная ими от волн и ветра. Однако в немецком языке слово бухта имеет расширенное значение и может обозначать как залив (например, Гудзонов залив – нем. *Hudson-Bucht*), так и море (например, Море Баффина – нем. *Baffin-Bucht*).

*Фьорд* (также фьёрд, фиорд) (норв. *fjord*) – узкий, извилистый и глубоко врезающийся в сушу морской залив со скалистыми берегами. Длина фьорда в несколько (чаще всего, в десятки) раз превосходит ширину. Берега фьорда в большинстве случаев образованы скалами высотой до 1000 метров.

*Лиман* (от греч. *λίμνας*) — мелководный залив при впадении реки в море. Лиман образуется при затоплении морем равнинных рек и может быть открытым (губа) или отделенным от моря узкой протяженной полосой суши – пересыпью. Обычно вода лимана имеет промежуточную соленость между водой моря и пресной водой реки, но при малом притоке пресной воды он может сильно засоляться вследствие испарения.

*Лагуна* (итал. *laguna*, лат. *lacus* – озеро) – мелкий водоем, отделенный от моря узкой полосой намытого песка (пересыпью) или коралловыми рифами. Типичный пример лагунного города – Венеция. Первоначально лагуной называлась только Венецианская лагуна, потом этот термин стал применяться к мелким заливам по всему миру.

Если в лагуну впадает крупная река, то вода в лагуне может быть почти пресной, а ее уровень может превышать уровень моря. Таковы, например, Куршский и Калининградский заливы.

Благодаря своей защищенности лагуны часто являются уникальными природными биотопами. Они служат приютом для водных птиц, рыб и зверей. Экологически важные лагуны находятся под защитой международных ведомств.

На Черном и Азовском морях лагуны называются лиманами.

*Пролив* (англ. *Channel, Strait*) – водное пространство, расположенное между двумя участками суши и соединяющее смежные водные бассейны или их части. Проливы характеризуются длиной, наименьшей и наибольшей шириной и глубиной. Также указывается направление и скорость течения. Для судоходных проливов составлены лоции.

Самый длинный пролив на Земле – Мозамбикский пролив, длина 1760 километров. Самый широкий пролив на Земле – пролив Дрейка, ширина 820 километров.

В мировой практике принята *классификация проливов* по следующим признакам:

*По бассейну океана:*

Пролив, расположенный в бассейне одного океана (пролив Дарданеллы, Атлантический океан).

Пролив, соединяющий бассейны двух океанов (Берингов пролив, Тихий и Северный Ледовитый океан).

*По континентам:*

Пролив, берега которого принадлежат одному континенту (Скагеррак, Европа).

Пролив, берега которого принадлежат различным континентам (Гибралтар, Европа и Африка).

*По территориальной принадлежности или международному статусу:*

- Международные, то есть открытые для прохода судов всех государств на равных условиях (Сингапурский пролив).

- Входящие в территориальные воды одного (Босфор, Турция) или нескольких государств (Керченский пролив, Россия и Украина). В этом случае проход судов других государств может осуществляться на возмездной или безвозмездной основе.

Поверхность моря называется **акваторией**. Часть акватории моря определенной ширины, тянущаяся полосой вдоль какого-либо государства, называется **территориальными водами**. Они входят в состав данного государства. Международное право не допускает расширения территориальных вод за пределы 12 морских миль (1 морская миля равна 1852 метра). Двенадцатимильную зону признали около 100 государств, в том числе и наше, а 22 страны самовольно установили более широкие территориальные воды. За пределами территориальных вод лежит открытое море, которое находится в общем пользовании всех государств.

В ряде случаев части океанов называются морями или заливами неправильно: так, заливы Персидский, Мексиканский, Гудзонов, Калифорнийский по своим гидрологическим режимам следует отнести к морям, тогда как море Бофорта (Северная Америка) должно называться заливом.

## 8.2. Водный баланс Мирового океана

Общее уравнение многолетнего годового водного баланса Мирового океана может быть записано в виде

$$x + y + w = z, \quad (8.1)$$

где  $x$  – осадки на поверхность океана (в среднем 1270 мм в год, или 458 000 км<sup>3</sup> в год;

$y$  – поверхностный сток 9124 мм, или 44700 км<sup>3</sup>, из них 41700 км<sup>3</sup> приходится на реки, 3000 км<sup>3</sup> – «ледниковый» сток Антарктиды и арктических островов);

$w$  – подземный сток (6 мм, или 2200 км<sup>3</sup>);

$z$  – испарение с поверхности океана (1400 мм, или 505000 км<sup>3</sup>).

Если учитывать небольшие изменения уровня Мирового океана, то уравнение годового водного баланса должно быть записано следующим образом:

$$x + y + w = z + \Delta u, \quad (8.2)$$

где  $\Delta u$  – изменение уровня (если члены уравнения представлены в величинах слоя) или объема (если члены уравнения представлены в объемных единицах).

В XX веке  $\Delta u$  составляло 1,7 мм/год, или 610 км<sup>3</sup>/год. Повышение уровня Мирового океана происходит в основном вследствие увеличения поступления вод в результате таяния ледников Антарктиды, Гренландии и арктических островов, увеличения атмосферных осадков, а также за счет увеличения объема океана в результате термического расширения воды.

Повышение температуры верхнего слоя океана в XX в. дало скорость прироста его уровня в 0,6–1,0 мм/год. По оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК-2001), в течении XX в. уровень Мирового океана в среднем повысился на 15 см, что дало прирост объема его вод на 54,2 тыс. км<sup>3</sup>, или на 0,004 %.

Атмосферные осадки дают 90,7 % приходной части водного баланса Мирового океана, а испарение – 100 % его расходной части. Для водного баланса Мирового океана характерно широтное изменение соотношения двух главных составляющих уравнения водного баланса – осадков и испарения. Оно связано с общими закономерностями распределения на Земле тепла и влаги, которые определяют и закономерное изменение с широтой осадков на поверхность океана и испарение с его поверхности.

Основными особенностями распределения осадков, испарения и разности ( $x - z$ ) являются: 1) общее увеличение осадков и испарения от полярных районов к низким широтам; 2) существование избытка осадков над испарением: в высоких широтах Северного полушария (арктический,

субарктический и частично умеренный климатические пояса, в высоких широтах Южного полушария (антарктический, субантарктический и частично умеренный климатический пояса) и низких широтах (экваториальный и субэкваториальный Северного полушария климатические пояса); 3) существование двух зон превышения испарения над осадками в обоих полушариях (тропический и субтропический климатические пояса).

Таким образом, в зонах, где  $x - z > 0$ , наблюдается разбавление морской воды пресной, уменьшение ее солености, причем избыток вод должен вызвать отток поверхностных вод из этих районов океана; в зонах, где  $x - z < 0$ , происходит осолонение вод, убыль вод должна приводить к их компенсации путем притока воды извне.

В водном балансе отдельных океанов следует выделять пресноводный баланс, т.е. баланс пресных вод в океане (пресная составляющая) и полный водный баланс, учитывающий водообмен между океанами. Пресноводный баланс составляет 2–4 % полного водного баланса отдельных океанов. В целом для Мирового океана ежегодно в круговороте воды вместе с атмосферой и суши участвует 505 тыс. км<sup>3</sup> пресной воды. Всего в движении вод между океанами вовлечено воды во много раз больше – около 200000 тыс. км<sup>3</sup> в год.

### 8.3. Морские течения и их классификация

*Морские течения* — постоянные или периодические потоки в толще мирового океана и морей. Различают постоянные, периодические и неправильные течения; поверхностные и подводные, теплые и холодные течения. В зависимости от причины течения выделяются *ветровые* и *плотностные* течения. Расход течения измеряется в свердрупах. *Свердруп* – это единица измерения объемного транспорта (расхода). Эквивалентна 10<sup>6</sup> кубическим метрам в секунду (0,001 км<sup>3</sup>/с). Используется в океанологии для измерения транспорта океанических течений. Символ  $S_v$ . Не является единицей СИ.

Течения классифицируют по различным признакам: по вызывающим их силам (генетические классификации), по устойчивости, по глубине расположения в толще вод, по характеру движения, по физико-химическим свойствам.

Выделяют три группы течений:

**1. Градиентные течения**, вызванные горизонтальными градиентами гидростатического давления, возникающими при наклоне изобарических поверхностей относительно изопотенциальных (уровневых) поверхностей

*Плотностные*, вызванные горизонтальным градиентом плотности.

*Компенсационные*, вызванные наклоном уровня моря под воздействием ветра.

*Бароградиентные*, вызванные неравномерным атмосферным давлением над морской поверхностью.

*Сейшевые*, возникающие в результате сейшевых колебаний уровня моря.

*Стоковые* или *сточные*, возникающие в результате возникновения избытка воды в каком-либо районе моря (как результат притока материковых вод, осадков, таяния льдов).

## **2. Течения, вызванные ветром**

*Дрейфовые*, вызванные только влекущим действием ветра.

*Ветровые*, вызванные и влекущим действием ветра, и наклоном уровня моря, и изменением плотности воды.

## **3. Приливные течения, вызванные приливами.**

Приливные течения наиболее сильные, особенно проявляются у берега, на мелководье, в проливах и устьях рек.

В океанах и морях течения обычно обусловлены совокупным действием нескольких сил. Течения, которые продолжают существовать после окончания действия вызвавших их сил, называют *инерционными*.

По изменчивости течения разделяют на периодические и непериодические.

*Периодические течения* меняются с определенным периодом. К таким течениям относят приливные течения.

*Непериодические течения* связаны с временными причинами (например, возникают под воздействием циклона). Выделяют течения, скорости и направления которых мало меняются за сезон (муссонные) или за год (пассатные).

Течения, которые не изменяются во времени, называют *установившимися течениями*, а изменяющиеся во времени – *неустановившимися*.

## **8.4. Приливы и отливы**

Приливы и отливы – периодические колебания уровня воды (подъемы и спады) в акваториях на Земле, которые обусловлены гравитационным притяжением Луны и Солнца, действующим на вращающуюся Землю. Все крупные акватории: океаны, моря и озера – в той или иной степени подвержены приливам и отливам, хотя на озерах они невелики.

Самый высокий уровень воды, наблюдаемый за сутки или половину суток во время прилива, называется *полной водой*, самый низкий уровень во время отлива – *малой водой*, а момент достижения этих предельных отметок уровня – *стоянием* (или стадией) соответственно прилива или отлива. Средний уровень моря – условная величина, выше которой расположены отметки уровня во время приливов, а ниже – во время отливов. Это результат осреднения больших рядов срочных наблюдений. Средняя высота прилива (или отлива) – осредненная величина, рассчитанная по большой

серии данных об уровнях полных или малых вод. Оба этих средних уровня привязаны к местному *футштоку*.

Вертикальные колебания уровня воды во время приливов и отливов сопряжены с горизонтальными перемещениями водных масс по отношению к берегу. Эти процессы осложняются ветровым нагоном, речным стоком и другими факторами. Горизонтальные перемещения водных масс в береговой зоне называют приливными (или приливо-отливными) течениями, тогда как вертикальные колебания уровня воды – приливами и отливами. Все явления, связанные с приливами и отливами, характеризуются периодичностью. Приливные течения периодически меняют направление на противоположное, тогда как океанические течения, движущиеся непрерывно и однонаправленно, обусловлены общей циркуляцией атмосферы и охватывают большие пространства открытого океана.

Приливы и отливы циклически чередуются в соответствии с изменяющейся астрономической, гидрологической и метеорологической обстановкой. Последовательность фаз приливов и отливов определяется двумя максимумами и двумя минимумами в суточном ходе.

Хотя Солнце играет существенную роль в приливо-отливных процессах, решающим фактором их развития служит сила гравитационного притяжения Луны (рис. 8.1).

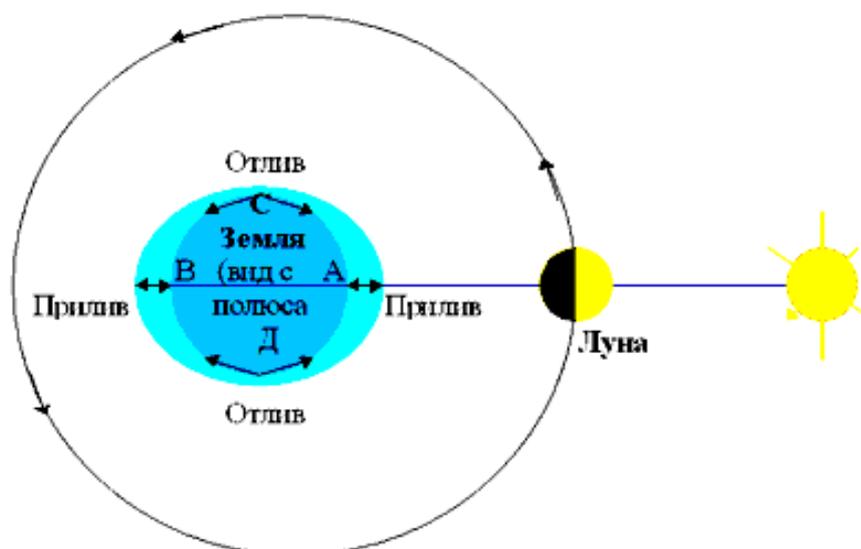


Рис. 8.1. Схема возникновения приливов и отливов:

в точках А и В притяжение Луны ослабляет силу тяжести на земной поверхности, а в точках С и Д наоборот, усиливает. В результате действия этих ускорений вода в океанах на одной половине Земли стремится к точке А, над которой Луна в зените; в другой половине Земли – к точке В, где Луна в надире: в точках А и В будет прилив, в точках С и Д – отлив

Действие приливообразующих сил на каждую частицу воды, независимо от ее местоположения на земной поверхности, определяется законом

всемирного тяготения Ньютона. Этот закон гласит, что две материальные частицы притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению масс обеих частиц и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. При этом подразумевается, что чем более масса тел, тем больше возникающая между ними сила взаимного притяжения (при одинаковой плотности меньшее тело создаст меньшее притяжение, чем большее). Закон также означает, что чем больше расстояние между двумя телами, тем меньше между ними притяжение. Поскольку эта сила обратно пропорциональна квадрату расстояния между двумя телами, в определении величины приливообразующей силы фактор расстояния играет значительно бóльшую роль, чем массы тел.

Гравитационное притяжение Земли, действующее на Луну и удерживающее ее на околоземной орбите, противоположно силе притяжения Земли Луной, которая стремится сместить Землю по направлению к Луне и «приподнимает» все объекты, находящиеся на Земле, в направлении Луны. Точка земной поверхности, расположенная непосредственно под Луной, удалена всего на 6 400 км от центра Земли и в среднем на 386063 км от центра Луны. Кроме того, масса Земли в 81,3 раза больше массы Луны. Таким образом, в этой точке земной поверхности притяжение Земли, действующее на любой объект, приблизительно в 300 тыс. раз больше притяжения Луны.

Существует представление, что вода на Земле, находящаяся прямо под Луной, поднимается в направлении Луны, что приводит к оттоку воды из других мест земной поверхности, однако притяжение Луны столь мало в сравнении с притяжением Земли, что его недостаточно, чтобы поднять столь огромный вес.

Тем не менее, океаны, моря и большие озера на Земле, будучи крупными жидкими телами, способны перемещаться под действием силы бокового смещения, и любая слабая тенденция к сдвигу по горизонтали приводит их в движение. Все воды, не находящиеся непосредственно под Луной, подчиняются действию составляющей силы притяжения Луны, направленной тангенциально (касательно) к земной поверхности, как ее составляющей, направленной вовне, и подвергаются горизонтальному смещению относительно твердой земной коры. В результате возникает течение воды из прилегающих районов земной поверхности по направлению к месту, находящемуся под Луной. Результирующее скопление воды в точке под Луной образует там прилив. Собственно приливная волна в открытом океане имеет высоту лишь 30–60 см, но она значительно увеличивается при подходе к берегам материков или островов.

За счет перемещения воды из соседних районов в сторону точки под Луной происходят соответствующие отливы воды в двух других точках, удаленных от нее на расстояние, равное четверти окружности Земли. Ин-

интересно отметить, что понижение уровня океана в этих двух точках сопровождается повышением уровня моря не только на стороне Земли, обращенной к Луне, но и на противоположной стороне. Этот факт тоже объясняется законом Ньютона. Два или несколько объектов, расположенные на разных расстояниях от одного и того же источника тяготения и повергающиеся, следовательно, ускорению силы тяжести разной величины, перемещаются относительно друг друга, поскольку ближайший к центру тяготения объект сильнее всего притягивается к нему. Вода в подлунной точке испытывает более сильное притяжение к Луне, чем Земля под ней, но Земля, в свою очередь, сильнее притягивается к Луне, чем вода на противоположной стороне планеты. Таким образом, возникает приливная волна, которая на обращенной к Луне стороне Земли называется прямой, а на противоположной – обратной. Первая из них всего на 5 % выше второй.

Благодаря вращению Луны по орбите вокруг Земли между двумя последовательными приливами или двумя отливами в данном месте проходит примерно 12 ч 25 мин. Интервал между кульминациями последовательных прилива и отлива около 6 ч 12 мин. Период продолжительностью 24 ч 50 мин между двумя последовательными приливами называется приливыми (или лунными) сутками.

## 8.5. Динамика температуры морской воды

Океан получает от Солнца много тепла. Занимая большую площадь, он получает тепла больше, чем суша. Но солнечные лучи нагревают только верхний слой воды толщиной всего несколько метров. Вниз от этого слоя тепло передается в результате постоянного перемешивания воды. Но необходимо заметить, что температура воды с глубиной понижается, сначала скачкообразно, а затем плавно. На глубине вода почти однородна по температуре, так как глубины океанов в основном заполнены водами одного и того же происхождения, формирующимися в полярных областях Земли. На глубине более 3–4 тысяч метров температура обычно колеблется от +2 °С до 0 °С.

Температура поверхностных вод также неодинакова и распределяется в зависимости от географической широты. Чем дальше от экватора, тем ниже температура. Это связано с различным количеством тепла, которое поступает от Солнца. Из-за шарообразности нашей планеты угол падения солнечного луча на экваторе больше, чем у полюсов, поэтому и тепла экваториальные широты получают больше, чем полярные. На экваторе наблюдаются наиболее высокие температуры вод океана – +28...+29 °С. К северу и югу от него температура воды понижается. Из-за близости холодной Антарктиды скорость понижения температур к югу несколько быстрее, чем к северу.

На температуру морской воды влияет и климат окружающих территорий. Особенно высока она в морях, окруженных жаркими пустынями, например в Красном море – до 34°C, в Персидском заливе – до 35,6 °С. В умеренных широтах температура изменяется в зависимости от времени суток.

Кроме географической широты и климата окружающих территорий, на температуру океанических вод влияют и течения. Теплые течения уносят теплые воды от экватора в умеренные широты, а холодные несут от полярных областей холодную воду. Подобное перемещение вод способствует более равномерному распределению температур в водных массах.

Самая высокая средняя температура у поверхности воды в Тихом океане равна 19,4 °С. Второе место (17,3 °С) занимает Индийский океан. На третьем месте – Атлантический океан, имеющий среднюю температуру около 16,5 °С. Наиболее низкая температура воды в Северном Ледовитом океане – в среднем чуть выше 1°C. Следовательно, для всего Мирового океана средняя температура поверхностных вод составляет около 17,5 °С.

Итак, океан поглощает тепла на 25–50 % больше, чем суша, и в этом его огромная роль для живых существ всей планеты. Солнце все лето нагревает его воду, а зимой эта прогретая вода постепенно отдает тепло атмосфере. Таким образом, Мировой океан – что-то вроде «котла центрального отопления» Земли. Без него на Земле наступят такие жестокие морозы, что погибнет все живое. Было подсчитано, что если бы океаны не сохраняли так бережно свое тепло, то средняя температура на Земле была бы равна –21 °С, а это на целых 36 °С ниже той, которую мы имеем на самом деле.

## 8.6. Соленость морской воды

Главным признаком, отличающим воды *Мирового океана* от вод суши, является их высокая *соленость*. Количество граммов веществ, растворенных в 1 литре воды, называют соленостью.

Морская вода – это раствор 44 химических элементов, но первостепенную роль в ней играют соли. Поваренная соль придает воде соленый вкус, а магниевая – горький. Соленость выражается в промилле (‰). Это тысячная доля числа. В литре океанической воды растворено в среднем 35 граммов различных веществ, значит соленость составляет 35 ‰.

В 1967 г. международным соглашением вместо старой формулы определения солености воды, предложенной М. Кнудсенom в 1902 г., была принята новая формула

$$S_{\text{‰}} = 0,030 + 1,805Cl_{\text{‰}} \quad (8.3)$$

Но так как солевой состав окраинных и внутренних морей всегда несколько отличается от среднего солевого состава океанских вод, существуют специальные формулы для определения солености отдельных морей например: для Черного –  $S_{\text{‰}} = 1,1856 + 1,7950Cl_{\text{‰}}$ , для Балтийского –  $S_{\text{‰}} = 0,115 + 1,805Cl_{\text{‰}}$  и т.д.

В связи с переходом в последние годы на электрометрический метод измерения солености была принята новая формулировка понятия солености через относительную электропроводность  $R_{15}$  при  $15^{\circ}\text{C}$  и атмосферном давлении:

$$S = a_0 + a_1R_{15} + a_2R_{15}^2 + a_3R_{15}^3 + a_4R_{15}^4 + a_5R_{15}^5, \quad (8.4)$$

где  $R_{15} = C_{\text{пробы}}/C_{35\text{‰}, 15^{\circ}}$  – отношение электропроводности морской воды при температуре  $15^{\circ}\text{C}$  и атмосферном давлении к электропроводности при температуре  $15^{\circ}\text{C}$  и солености  $35 \text{‰}$ .

Вместо природной воды в знаменателе выражения  $R_{15}$  стали использовать раствор хлористого калия  $\text{KCl}$ , была введена Шкала практической солености (1978 г.). При массовой доле  $\text{KCl} = 32,4 \cdot 10^{-3}$ ,  $T = 15^{\circ}\text{C}$  и атмосферном давлении  $R_{15} = 1$ , а практическая соленость при этом равна  $35,00 \text{‰}$ , или 35 единиц практической солености.

Количество солей, растворенных в Мировом океане, составляет примерно  $49,2 \cdot 10$  тонн. Для того чтобы наглядно представить себе, насколько велика эта масса, можно привести следующее сравнение. Если всю морскую соль в сухом виде распределить по поверхности всей суши, то та окажется покрытой слоем толщиной в 150 м.

Соленость вод океана не везде одинакова. На величину солености влияют следующие процессы:

- испарение воды (при этом процессе соли с водой не испаряются);
- льдообразование;
- выпадение атмосферных осадков, понижающих соленость;
- сток речных вод (соленость вод океана у материков значительно меньше, чем в центре океана, так как воды рек опресняют ее);
- таяние льдов.

Такие процессы, как испарение и льдообразование, способствуют повышению солености, а выпадение осадков, сток речных вод, таяние льдов понижают ее. Главную роль в изменении солености играют испарение и выпадение атмосферных осадков. Поэтому соленость поверхностных слоев океана, так же, как и температура, зависит от климатических условий, связанных с широтой.

Соленость Красного моря –  $42 \text{‰}$ . Это объясняется тем, что в это море не впадает ни одной реки, атмосферных осадков здесь выпадает очень мало (тропики), испарение воды от сильного нагрева солнцем очень большое. Вода испаряется из моря, а соль остается. Соленость Балтийского

моря не выше 1 ‰. Это объясняется тем, что это море находится в климатическом поясе, где меньше испарение, но выпадает больше осадков. Однако общая картина может нарушаться течениями. Это особенно хорошо заметно на примере Гольфстрима – одного из самых мощных течений в океане, ветви которого, проникая далеко в Северный Ледовитый океан (соленость 10–11 ‰), несут воды с соленостью до 35 ‰. Обратное явление наблюдается у берегов Северной Америки, где под воздействием холодного арктического течения, например Лабрадорского, понижается соленость воды у берегов.

Соленость глубинной части океана в целом практически постоянна. Здесь отдельные слои воды с различной соленостью могут чередоваться по глубине в зависимости от их плотности.

Воды, соленость которых не превышает 1 ‰, называются пресными.

## 8.7. Океан и климат

В последние десятилетия сложилось понимание того, что океан и атмосферу нужно рассматривать как единую систему. Эти две среды, находясь в непосредственном контакте, непрерывно обмениваются энергией (внутренней и механической) и веществом. Все процессы в океане и атмосфере (кроме приливов) имеют единый источник энергии – солнечное излучение. Усвоение солнечной радиации зависит от состояния атмосферы и океана, поэтому нельзя отделить получение энергии от процесса ее передачи и трансформации, которые вместе формируют природную среду, ее физические, химические и биологические характеристики, а также скорость преобразования энергии из одного вида в другой.

Если океан влияет на атмосферные процессы в основном через тепло- и влагообмен, то атмосфера воздействует на океан не только через эти потоки, но и динамически. Термический режим и соленость вод океанов и морей, течения в значительной мере обусловлены действием атмосферы, если не непосредственно, то косвенным образом. Атмосферные движения вызывают перемещения больших масс воды, переносящих накопленную ими теплоту в районы с совершенно иными климатическими характеристиками, где эта тепловая аномалия изменяет свойства воздушной массы над океаном. Передача атмосферой количества движения (импульса) – важнейшая причина возникновения движения в верхнем слое океана. Под воздействием касательного напряжения ветра в океане возникают ветровые волны, турбулентность, дрейфовые течения. Колебания атмосферного давления напрямую изменяют уровень океана, вызывают сгонно-нагонные явления.

Очень важен в современных условиях и газообмен между океаном и атмосферой. Например, океаны содержат в 50 раз больше диоксида угле-

рода, чем атмосфера. В настоящее время примерно 1/3 часть ежегодного антропогенного поступления  $\text{CO}_2$  от сжигания топлива в атмосферу усваивается океаном.

Таким образом, под воздействием между океаном и атмосферой следует понимать совокупность различных по масштабам процессов перераспределения и трансформации солнечной энергии, водяного пара, газов, солей, количества движения (импульса) в процессе обмена свойствами между океаном и атмосферой, в результате которых формируется природа Земли.

При взаимодействии атмосферы и океана, как правило, трудно выделить причину и следствие того или иного процесса, поскольку воздействие одной сферы на другую происходит с многочисленными обратными связями. Положительные обратные связи усиливают первоначальное воздействие, отрицательные (их большинство) – препятствуют его развитию. Например, при увеличении температуры поверхности океана увеличивается испарение, в атмосферу попадает больше влаги, увеличивается облачность, задерживающая длинноволновое излучение поверхности океана. При этом температура подоблачного слоя атмосферы и поверхности океана еще более возрастает – это положительная обратная связь. С другой стороны, возрастание облачности повышает альбедо атмосферы, меньше коротковолновой радиации достигает поверхности океана, и ее температура должна понижаться – так работает отрицательная обратная связь.

Взаимодействие океана и атмосферы охватывает очень широкий диапазон масштабов – от долей секунды и сантиметров до сотен лет и десятков тысяч километров. В то же время каждый масштаб характеризуется и своими особенностями обмена энергией, влагой, газами и другими компонентами, а также своими механизмами превращений энергии и вещества. Выделяют следующие наиболее важные временные масштабы изменчивости океанских процессов:

*мелкомасштабный* ( $10^{-1}$ – $10^3$  с, т.е. от долей секунды до десятков минут) – достаточно хорошо прослеживается и в атмосфере, например по скорости ветра, и в океане – он соответствует периоду ветровых волн;

*мезомасштабный* ( $10^4$ – $10^5$  с) – этот класс явлений с периодом от часов до суток выделяется в связи с широко встречающейся внутрисуточной изменчивостью гидрометеорологических элементов;

*синоптический* ( $10^6$ – $10^7$  с, от нескольких суток до месяцев), связанный с атмосферными и океанскими вихрями, фронтальными зонами, неоднородностью потоков теплоты и импульса;

*сезонный* (годовой период), определяемый годовым склонением Солнца и поступлением солнечной радиации на поверхность раздела «океан – атмосфера»;

*межгодовой*, связанный с колебаниями характеристик теплообмена отдельных областей океана и всей атмосферы, самый яркий пример такого колебания – явление Эль-Ниньо/Южное Колебание в низких широтах;

*долгопериодный* (внутривековой и межвековой), определяемый изменчивостью формирования глубинных водных масс океана и глобальной циркуляции.

Часто эти масштабы, начиная с синоптического, объединяют в общую группу крупномасштабных процессов. Именно для этих масштабов характер изменчивости климатической системы Земли в значительной степени определяется процессами, происходящими в океане.

Крупномасштабный теплообмен океана и атмосферы определяется разностями температур воды и воздуха. Средняя температура поверхности воды в океане 17,5 °С, примерно на 3 °С выше температуры приземного слоя воздуха (14,5 °С). Максимумы (5–7 °С) эти различия достигают во фронтальных областях, приуроченных к границам теплых и холодных течений – Гольфстрима и Лабрадорского, Куроисио и Курило-Камчатского, где складываются специфические условия выноса на теплую поверхность океана холодного континентального воздуха. Поскольку потоки энергии между океаном и атмосферой определяются контрастами температуры в зоне их контакта, такие районы называют *энергоактивными областями*, т.е. акваториями с повышенной активностью энергообмена. Среди таких областей, помимо вышеперечисленных, следует отметить районы муссонной циркуляции (моря Индонезии), районы апвеллинга (Канарского, Перуанского и т.д.), области окраинных морей (Норвежского, Гренландского, Берингова). Всю акваторию Северной Атлантики можно считать энергоактивной зоной глобального масштаба: занимая 11 % площади Мирового океана, она обеспечивает 19 % общего потока энергии в атмосферу (причины этого будут объяснены ниже).

Поглощаемая Землей приходящая коротковолновая солнечная радиация в отдельной точке не компенсируется уходящей длинноволновой радиацией, хотя при этом интегральный тепловой баланс планеты остается нулевым. Следовательно, избыточная тепловая энергия, получаемая в тропиках, должна переноситься в высокоширотные районы и тем самым обеспечивать стабильный тепловой режим на планете. Этот меридиональный перенос тепловой энергии может осуществляться в двух средах – океане и атмосфере. До недавнего времени считалось, что меридиональный перенос теплоты в атмосфере во много раз больше, чем в океане. Лишь с развитием спутниковых методов оценки радиационного баланса было установлено, что океанское звено меридионального переноса тепловой энергии сравнимо с атмосферным.

Наиболее наглядно процесс преобразования энергии в климатической системе можно представить с помощью предложенной В. Шулейкиным

(1968) концепции природных тепловых машин разных масштабов. Природная тепловая машина первого рода работает на контрасте экватор (нагреватель) – полюса (холодильники). Машина второго рода отвечает за обмен воздушными массами между океаном и континентами – за муссонную циркуляцию, которая меняет в течение года направление в соответствии с тем, как меняют свою относительную роль нагревателей и холодильников континенты и океаны. С.С. Лаппо (1984) предположил, что существует и более крупная по масштабу тепловая машина «нулевого рода». Она работает за счет глобального контраста в температуре и солености воды между отдельными бассейнами Мирового океана и приводит к возникновению глобальной меж океанской циркуляции или «глобального океанского конвейера».

Возникновение меж океанской циркуляции во многом определяется особенностями географического положения Атлантического океана. Меридиональное простираие и относительная узость по широте, свободный водообмен с Арктическим бассейном и приантарктическими секторами Тихого и Индийского океанов, гидрологические особенности окраинных морей, отсутствие значительных орографических барьеров для воздушных масс у западного берега в умеренных широтах – все это формирует своеобразную картину тепло- и влагообмена на его поверхности. В целом Атлантика, в отличие от других океанов, отдает теплоту в атмосферу 0,6 ПВт (1 Петаватт – сокращенно ПВт – равен 10<sup>15</sup> Вт), а превышение испарения над осадками и речным стоком достигает 0,3 миллиона м<sup>3</sup>/с. Интересно сравнить средние характеристики Тихого и Атлантического океанов к северу от экватора. Поверхностный слой Атлантики оказывается на 6°С холоднее, чем в Тихом океане. Но при этом, по расчетам С. А. Добролюбова (1987), средняя по объему температура всей толщи вод северной части Атлантики теплее на 1,3°С, а средняя соленость выше на 0,5 ‰, чем в северной части Тихого океана. Таким образом, в целом теплая и соленая Северная Атлантика на поверхности холоднее, а в глубинных слоях в среднем теплее холодной и распресненной северной части Тихого океана. Вследствие этих различий средняя плотность воды северной части Тихого океана от поверхности до дна оказывается значительно ниже, а уровень поверхности – почти на 1 м выше, чем в Северной Атлантике, причем эта разница более чем на 3/4 определяется различиями в солености. Поток теплых вод по наклону уровня из Тихого океана в Атлантику через моря Индонезии, Индийский океан и вокруг Южной Африки и составляет верхнюю ветвь «глобального океанского конвейера».

В процессе такого меж океанского обмена в поверхностных слоях идет поток теплых вод из Тихого и Индийского океанов в субполярные районы Северной Атлантики. Процессы взаимодействия между океаном и атмосферой приводят к охлаждению воды и ее погружению вглубь океана, т.е. к формированию глубинной Северо-Атлантической водной массы, обра-

зующей поток холодных вод, который движется в противоположном направлении. Вследствие разности температур движущихся на север теплых вод и распространяющейся на юг Северо-Атлантической глубинной воды формируется дополнительный поток теплоты в Северное полушарие, приводящий, в конечном счете, к смягчению климата Европы. Таким образом, возникающая в результате градиентов солености вод межокеанская циркуляция определяет тепловое взаимодействие между океаном и атмосферой.

Вплоть до недавнего времени считалось, что в глубинных слоях океана отсутствует изменчивость характеристик водных масс. Однако в 1990-х годах были обнаружены значимые климатические изменения температурно-соленостных характеристик на промежуточных и придонных горизонтах, колебания переносов теплоты океанскими течениями в умеренных широтах. Например, наблюдается климатически значимое постоянное охлаждение и разопреснение глубинных слоев Северной Атлантики на протяжении 1970–1990-х гг., сменившееся к началу XXI века фазой потепления. Оказалось, что на этот процесс оказывают воздействие колебания атмосферного давления в северной части Атлантики – так называемое Северо-Атлантическое колебание. Индекс этого колебания тем выше, чем больше разница давлений между Азорским максимумом и Исландским минимумом. При большой величине индекса усиливается западный перенос в атмосфере умеренных широт, интенсивность циклонов в области формирования глубинных вод, глубина конвекции, объем вновь образующейся глубинной воды, меридиональный перенос теплоты в средних широтах Атлантики; малые значения индекса замедляют все эти процессы.

Таким образом, условия на поверхности океана не только влияют на характеристики теплообмена с атмосферой, но и на глубинные воды, а значит, и на весь «межокеанский конвейер». Поскольку движение вод у дна океана происходит очень медленно, климатический сигнал в виде аномалии температуры и солености из Северной Атлантики распространяется в нижнем звене «глобального конвейера» за многие сотни и даже тысячи лет.

Анализ подобных природных феноменов дает ключ к пониманию механизма воздействия океана на климат: холодные воды Северной Атлантики контролируют количество теплоты в атмосфере над средними и высокими широтами Северного полушария. Поэтому информация о состоянии «океанского конвейера» даст возможность определить современное состояние климата и тенденции его развития.

## 8.8. Экологическое состояние Мирового океана

Несмотря на огромные размеры океана, человек все сильнее влияет на его природные условия. Если раньше негативные последствия хозяйственной деятельности проявлялись лишь в прибрежных районах океана, то те-

перь они сказываются и на открытых его частях. Неблагоприятное влияние человека на океан заключается прежде всего в изменении его экологического состояния, загрязнении его вод и чрезмерной добыче промысловых морских организмов.

К началу XXI в. одним из приоритетных направлений исследования океана стала оценка его экологического состояния и происходящих изменений. Устойчивость океана к внешним воздействиям достаточно велика из-за огромного объема его вод и процессов активного обмена с другими природными сферами. Океан в своих реакциях более инертен, чем, например, атмосфера и воды суши; необходим длительный период, чтобы неощутимые вначале последствия этих воздействий стали очевидны. Благодаря инертности реагирования, изменения, вызванные хозяйственной деятельностью в океане, могут оказаться наиболее опасными – нарушенное равновесие в Мировом океане очень сложно восстановить.

Современное негативное антропогенное влияние на морскую среду в основном состоит в увеличении поступления загрязняющих веществ. Антропогенная составляющая стока некоторых загрязняющих веществ (нефть, свинец, ртуть, мышьяк и т.д.) сравнима и иногда даже превышает природную. Океаны представляют собой зону аккумуляции загрязняющих веществ, «конечный пункт», независимо от того, в какую среду они были сброшены первоначально. Вклад атмосферного загрязнения Мирового океана примерно соизмерим с долей речного стока в балансе загрязняющих веществ, поступающих в морскую среду. Одна из важнейших современных проблем – антропогенное воздействие на глобальный цикл углерода. В атмосфере постоянно накапливается диоксид углерода, избыток которого может поглотить только океан. При этом  $\text{CO}_2$  удаляется из системы «атмосфера – верхние слои океана» в процессе перемешивания вод. Дополнительный механизм переноса  $\text{CO}_2$  – гравитационное осаждение взвешенных органических веществ (биогенная седиментация).

При анализе последствий загрязнения выделяют группу наиболее распространенных загрязняющих веществ, таких, как нефтяные углеводороды, тяжелые металлы, поверхностно-активные вещества, хлорорганические и фосфорорганические вещества, искусственные радионуклиды, биогенные и органические вещества, которые формируют крупномасштабное фоновое загрязнение гидросферы. Почти все загрязняющие вещества, попадающие в океан, включаются в биологические циклы и концентрируются в тканях гидробионтов, особенно хищников, в количествах, представляющих экологическую опасность.

Загрязняющие вещества неравномерно распределяются в океане. Чрезвычайно тревожная в экологическом плане особенность загрязнения океана – это приуроченность повышенного содержания техногенных примесей к областям и зонам наибольшего сосредоточения морских организмов, соз-

дающих основную продукцию органического вещества: моря, особенно внутренние, прибрежные воды и шельфовые зоны, эстуарии, границы раздела природных сред, фронтальные зоны, поверхностный (*фотический*) слой воды, куда направлен основной пресс антропогенного воздействия. Вертикальное перемешивание, горизонтальные и вертикальные движения воды способствуют переносу токсичных веществ на большие расстояния и в глубокие слои океана.

Прибрежные районы, составляющие 13 % общей площади океана, – это зона наибольшего антропогенного воздействия. С ними связана жизнь 50 % населения Земли, здесь создается 40 % первичной продукции органического вещества, на них приходится 90 % вылова рыбных ресурсов, и возрастание антропогенного воздействия приводит к *евтрофикации* и микробиологическому заражению морских вод и *гидробионтов*. Кроме того, загрязняющие вещества оседают в прибрежных районах и накапливаются.

В открытых районах океана экосистемы и отдельные гидробионты испытывают воздействие низких доз устойчивых химических загрязняющих веществ. Опасность здесь – в постоянном характере такого влияния.

Антропогенное воздействие влияет не только на биотическую составляющую морских экосистем. Оно проявляется в нарушениях гидрологического и гидрохимического режимов, процессов тепло-, влаго- и газообмена между океаном и атмосферой, естественных биогеохимических циклов, определяя экологические условия в тонком приповерхностном слое океана, в котором обитает специфическое сообщество организмов – *нейстон* и *плейстон*.

Ежегодно в океан попадает не менее 10 млн т нефти. Главные источники нефтяного загрязнения – это морской транспорт (сброс промывочных вод с танкеров, утечки при разгрузочно-погрузочных работах и транспортировке нефти, аварии крупнотоннажных танкеров); промышленные и коммунально-бытовые стоки, поступающие с берегов и из устьев рек; утечки и аварии при нефтедобыче на морском дне, а также военные конфликты (особенно в районе Персидского залива). Наиболее сильно загрязнена нефтью Северная Атлантика. Страдают от нефтяного загрязнения и некоторые прибрежные районы и портовые акватории в России.

Нефть воздействует на прохождение циклов других загрязняющих веществ, например хлорированных углеводородов, которые растворяются в нефтяных пленках. Хлорированные углеводороды – устойчивые высокотоксичные вещества, они составляют группу неприродных компонентов среды и представляют в настоящее время наибольшую опасность для биосферы. Несмотря на значительное сокращение промышленного использования хлорированных углеводородов, они широко распространены, особенно в прибрежных районах и внутренних морях. Взаимодействие органических соединений с тяжелыми металлами также усиливает их негативное влияние на морские организмы.

Разливающаяся по поверхности моря нефть (1 т нефти может покрыть около 12 км<sup>2</sup> морской поверхности) создает пленку, затрудняющую газо-

обмен воды с атмосферой. Пока можно утверждать, что нефтяные пленки еще не оказывают глобального влияния на процессы обмена веществом и энергией между океаном и атмосферой. Однако во внутренних морях, в прибрежных районах, в отдельных областях океана (вдоль танкерных маршрутов) имеют место региональные последствия отрицательного воздействия этих пленок на свойства поверхности раздела «вода – воздух». Кроме нефти, к органическим загрязняющим веществам относятся детергенты, бытовые стоки, уменьшающие силу поверхностного натяжения. Наличие органических пленок (в том числе нефтяных) приводит к изменению температуры поверхностного микрослоя. Сокращая испарение, они препятствуют возникновению потока теплоты в нижележащие слои океана, служат дополнительным барьером, препятствующим прохождению молекул газа через поверхность раздела.

На приповерхностных экосистемах негативно отражается также влияние кислотных дождей, особенно в изолированных опресненных морях (Балтийское море). Кислотные дожди вызывают изменения рН среды в сторону подкисления в поверхностном микрослое, что нарушает нормальную жизнедеятельность *нейстонных* организмов. Изменение рН среды, кроме того, ведет к нарушению газообмена между океаном и атмосферой. Происходит смещение в системе «океан – атмосфера» в сторону уменьшения поступления  $\text{CO}_2$  в водную среду и более активного выделения  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

С развитием ядерной энергетики наблюдается постепенное повышение радиоактивности морских вод в результате сброса отходов с атомных электростанций и эксплуатации судов с атомными двигателями. Радиоактивные стоки присутствуют в Балтийском, Северном, Средиземном морях, прибрежных водах Японии, США и других районах.

Для оценки экологического состояния морских вод большое значение имеет знание особенностей гидрохимического режима. Биогенные вещества представляют собой важный фактор, определяющий размеры популяции. Особую роль в функционировании морских экосистем играют бактерии. Они участвуют в разложении органических веществ, регенерации биогенных элементов (это естественные процессы), а также в разложении органических соединений, попадающих в океан в виде загрязняющих веществ (например, нефть).

В прибрежных водах, особенно у берегов промышленно развитых стран, в последнее время наблюдаются серьезные нарушения естественных условий водной среды, ухудшается качество воды в связи с повышением содержания органических веществ, возникают зоны с недостатком или отсутствием кислорода (зоны гипоксии), появляется сероводород. Избыточное содержание органических веществ характерно для вод Балтийского, Черного, Каспийского, Азовского и других морей. Зарегулирование стока крупных рек вызывает нарушение их гидрологического режима, изменение внутритрового распределения стока, изменение межсезонной и многолет-

ней динамики химического состава воды, сглаживание его сезонных колебаний, а затем – и значительные изменения в режиме морей, куда эти реки впадают. Водохранилища на Волге, Днепре, Дону и других реках «цветут», соответственно, большая часть фосфатов, нитратов и кремния ассимилируется фитопланктоном, а затем частично оседает и аккумулируется в донных осадках. В море с речным стоком выносятся аммоний, мочевины, органические соединения азота и фосфора. Большое количество выносимого реками органического вещества вызывает увеличение первичной продукции в ряде морей. Как следствие, изменилась гидрохимическая основа биопродуктивности Каспийского, Азовского, Черного морей. Их экосистемы в настоящее время находятся в переходном периоде к установлению нового равновесия при изменившемся химическом стоке рек. Процессы антропогенного евтрофирования затронули и арктические моря, но в значительно меньшей степени.

Морские экосистемы благодаря своей динамичности достаточно устойчивы к умеренному внешнему воздействию. Это определяется совокупностью всех природных факторов, которые способствуют восстановлению естественных свойств и состава воды.

*Самоочищение* – совокупность всех природных процессов, направленных на восстановление первоначальных свойств и состава воды, разложение, утилизацию загрязняющих веществ. Гидродинамические факторы, не являясь по существу факторами самоочищения, могут способствовать ускорению или торможению самоочищения. Главным фактором самоочищения природных вод от загрязняющих органических веществ выступает прежде всего жизнедеятельность микроорганизмов – деструкторов, способных трансформировать эти вещества и переводить их в минеральную форму. Проблема количественной оценки всех факторов самоочищения очень сложна и далека от окончательного решения.

Способность экосистемы в результате действия всех перечисленных процессов обеспечить защиту от внешнего (в основном антропогенного) вмешательства называют *ассимиляционной емкостью*, которая представляет собой меру естественного «иммунитета». Она характеризует допустимую степень накопления токсичных веществ в морской экосистеме, а также возможность их активного разложения и удаления с сохранением основных свойств экосистемы.

С концепцией ассимиляционной емкости морской экосистемы тесно связана концепция водных масс. Изучение происхождения и структуры водных масс, времени их обновления позволяет определить условия и основные черты циркуляции загрязняющих веществ в морской экосистеме в целом или ее частях. Таким путем можно попытаться определить «время жизни» химического соединения, основные закономерности его биохимического цикла. Концепция водных масс также тесно связана с концепцией биологической индикации океана. С помощью биологической индикации изучаются экологические последствия загрязнения морской среды.

Огромный вред морской фауне нанесла чрезмерная и неконтролируемая добыча промысловых рыб и некоторых других животных. Почти полностью истреблены котики на Командорских островах, сократилась численность китов, нарушено воспроизводство осетровых в Каспийском море, сельди в Атлантике.

Угроза, которой подвергаются океаны и моря от загрязнения вод и хищнического вылова некоторых видов морских организмов, имеет глобальный характер. Ее предотвращение требует международных усилий в сокращении сбросов загрязняющих веществ в океаны и моря, в регулировании промысла морских организмов с полным запретом вылова некоторых видов. Совершенно ясно, что в разработке таких мер важная роль должна принадлежать гидрологии океанов – океанологии.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Что называют океаном?
2. Из каких океанов состоит Мировой океан?
3. Какой из океанов самый большой и самый глубокий океан Земли?
4. Как называется часть Мирового океана, обособленная сушей или возвышениями подводного рельефа?
5. Как называют часть океана, моря или озера, глубоко вдающаяся в сушу, но имеющая свободный водообмен с основной частью водоема?
6. Как называется небольшая часть моря, залива, озера, водохранилища, обособленная от открытых вод частями суши (выступами берегов, скалами и близлежащими островами) и защищенная ими от волн и ветра?
7. Что такое лиман?
8. Как называют часть акватории моря определенной ширины, тянущаяся полосой вдоль какого-либо государства?
9. Как называют течения, вызванные изменениями гидростатического давления по глубине, возникающие при наклоне изобарических поверхностей относительно горизонта?
10. Как называют периодические колебания уровня воды (подъемы и спады) в акваториях на Земле, которые обусловлены гравитационным притяжением Луны и Солнца, действующим на вращающуюся Землю?
11. Какое время проходит благодаря вращению Луны по орбите вокруг Земли между двумя последовательными приливами или двумя отливами в данном месте?
12. Как называют совокупность всех природных процессов, направленных на восстановление первоначальных свойств и состава воды, разложение, утилизацию загрязняющих веществ?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены вопросы, необходимые экологу направления подготовки «Техносферная безопасность» для исследования водных объектов Земли, грамотного использования их для получения пресных вод и защиты от загрязнения, засорения и истощения.

Рассмотренные в пособии методы исследования водных источников, методики выполнения гидрологических и водохозяйственных расчетов отвечают действующим нормативным документам. Однако рамки пособия не позволили рассмотреть примеры выполнения таких расчетов.

Практика применения современных методов и приёмов исследований даёт возможность постоянно совершенствовать методики проведения этих расчётов. Эти вопросы будут освещаться при переиздании настоящего пособия по мере появления изменений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. VI Всероссийский гидрологический съезд, 28 сентября – 1 октября 2004 г., Санкт-Петербург [Текст]: тезисы докладов. – СПб.: Гидрометеиздат, 2004.
2. Водный кодекс Российской Федерации [Текст]. – М.: Проспект, Омега-Л, 2009. – 40 с.
3. Воробьев, В.Н. Общая океанология. Динамические процессы [Текст] / В.Н. Воробьев, И.П. Смирнов – СПб.: Изд-во РГМУ, 1999. – 230 с.
4. Гидрология: учебник для вузов [Текст] / В.Н. Михайлов, А.Д. Добровольский, С.А. Добролюбов. – М.: Высш. шк., 2008. – 463 с. – (серия «Классический университетский учебник»).
5. Гидрология [Текст]: учеб. пособие по курсу «Науки о Земле» для студентов, обучающихся по специальности 28020265 «Инженерная защита окружающей среды» / сост. В.А. Михеев. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 200 с.
6. ГОСТ 17. 1.1.02–77. Охрана природы. Гидросфера. Классификация водных объектов [Текст].
7. ГОСТ 19179–73. Гидрология суши. Термины и определения [Текст].
8. Долматов, О.А. Проектирование интегрированного курса «Науки о Земле» для подготовки инженеров-экологов [Текст]: дис. ... канд. пед. наук. – М.: ПроСофт-М, 2003.
9. Константинов, Н.М. Гидравлика, гидрология, гидрометрия [Текст]: учеб. для вузов: в 2 ч. Ч. II. Специальные вопросы / Н.М. Константинов, Н.А. Петров, Л.И. Высоцкий; под ред. Н.М. Константинова. – М.: Высш. шк., 1987. – 431 с.
10. Кощуг, Д.Г. Науки о Земле [Текст]: учеб. пособие / Д.Г. Кощуг, Д.Н. Филиппов, Е.А. Фортыгина. – М.: РГОТУПС, 2003. – 353 с.
11. Михайлов, В.Н. Общая гидрология [Текст]: учебник для геогр. спец. вузов / В.Н. Михайлов, А.Д. Добровольский. – М.: Высш. шк., 1991. – 368 с.
12. Пензенская область. Водные ресурсы: информационное издание Федерального агентства водных ресурсов [Текст]. – Н. Новгород: Изд-во «Деловая полиграфия», 2013. – 100 с.
13. Передельский, Л.В. Инженерная геология [Текст]: учебник для строительных специальностей вузов / Л.В. Передельский, О.Е. Приходченко. – Ростов н/Д : Феникс, 2006. – 448 с. – (Высшее образование).
14. Смирнов, Г.Н. Гидрология и гидротехнические сооружения [Текст]: учебник для вузов по специальности «Водоснабжение и канализация» / Г.Н. Смирнов, Е.В. Витрешко, И.А. Мальгина; под ред. Г.Н. Смирнова. – М.: Высш. шк., 1988. – 472 с.
15. СП 33-101–2003 Определение основных гидрологических характеристик [Текст]. – М.: Госстрой, 2004.

16. Экологический энциклопедический словарь [Текст]. – М.: Издательский дом «Ноосфера», 1999. – 930 с.

17. Ясманов, Н.А. Основы геоэкологии [Текст]: учеб. пособие для эколог. специальностей вузов / Н.А. Ясманов. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 352 с.

### Интернет-ресурсы

1. <http://mig.mecom.ru/>
2. <http://www.elibrary.ru>
3. <http://www.iqlib.ru/book/preview/F0011B99AA444AE8A92F2906611EE07B>
4. [omen.perm.ru/learn/pgu2k/question\\_gidrologiya.html](http://omen.perm.ru/learn/pgu2k/question_gidrologiya.html)
5. [study.crimea.ua/file3311.html](http://study.crimea.ua/file3311.html)
6. [www.msucity.ru/f260/gidrologiya-8657/](http://www.msucity.ru/f260/gidrologiya-8657/)
7. [www.krugosvet.ru/enc/Earth...GIDROLOGIYA.html](http://www.krugosvet.ru/enc/Earth...GIDROLOGIYA.html)
8. [www.vseslova.ru/index.php?dictionary...gidrologiya](http://www.vseslova.ru/index.php?dictionary...gidrologiya)
9. [books4study.biz/f3311.htm](http://books4study.biz/f3311.htm)
10. [www.diclib.com/cgi-bin/d1.cgi](http://www.diclib.com/cgi-bin/d1.cgi)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ГИДРОЛОГИЯ КАК НАУКА.....	10
1.1. Понятие о гидросфере. Водные объекты. Использование природных вод .....	10
1.2. Предмет изучения, составные части гидрологии.....	14
1.3. Методы изучения гидрологических процессов .....	15
1.4. Круговорот воды в природе. Водный баланс в гидрологии .....	15
1.5. Водные ресурсы.....	19
2. ГИДРОЛОГИЯ РЕК.....	25
2.1. Общие сведения о реках .....	25
2.2. Речной сток .....	42
2.3. Гидрологические расчёты .....	58
3. ГИДРОМЕТРИЯ .....	72
3.1. Общие положения .....	72
3.2. Измерение уровней .....	73
3.3. Промерные работы.....	76
3.4. Измерение скорости течения воды.....	80
3.5. Определение расходов воды .....	85
4. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА .....	90
4.1. Задачи и виды регулирования стока.....	90
4.2. Характерные режимы, объёмы и уровни воды в водохранилище .	91
5. ГИДРОЛОГИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ И ОЗЕР .....	95
5.1. Типы водохранилищ и озёр.....	95
5.2. Основные морфометрические характеристики водоемов .....	99
5.3. Водный баланс водоемов.....	101
5.4. Термический режим водоемов.....	103
5.5. Ледовые явления на озерах .....	106
5.6. Динамика уровня воды в водохранилищах и озерах.....	107
5.7. Движение воды в озерах и водохранилищах.....	109
5.8. Влияние водохранилищ на окружающую среду.....	112
5.9. Влияние озёр на речной сток .....	115
6. ГИДРОЛОГИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД.....	118
6.1. Вода в земной коре.....	118
6.2. Интенсивность водообмена подземных вод.....	119
6.3. Происхождение подземных вод .....	120
6.4. Классификация подземных вод .....	121
6.5. Естественные выходы подземных вод на поверхность.....	133

6.6. Режим и баланс подземных вод .....	135
6.7. Запасы и ресурсы подземных вод.....	140
6.8. Охрана подземных вод от истощения и загрязнения.....	143
7. ГИДРОЛОГИЯ БОЛОТ .....	151
7.1. Происхождение болот.....	151
7.2. Типы болот.....	152
7.3. Морфология и гидрология болот.....	154
7.4. Влияние болот на речной сток. Хозяйственное значение болот..	156
8. ГИДРОЛОГИЯ МОРЕЙ.....	160
8.1. Мировой океан и его структура.....	160
8.2. Водный баланс Мирового океана .....	165
8.3. Морские течения и их классификация .....	166
8.4. Приливы и отливы.....	167
8.5. Динамика температуры морской воды .....	170
8.6. Соленость морской воды .....	171
8.7. Океан и климат .....	173
8.8. Экологическое состояние Мирового океана.....	177
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	183
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	184

Учебное издание

Каледа Ирина Анатольевна  
Круглов Леонид Васильевич  
Гришин Борис Михайлович

**ГИДРОЛОГИЯ**

Учебное пособие по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная  
безопасность»

Редактор Н.Ю. Шалимова  
Верстка Т.А. Лильп

Подписано в печать 11.01.16. Формат 60×84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл.печ.л.10,93. Уч.-изд.л. 11,75. Тираж 80 экз.  
Заказ № 40.



---

Издательство ПГУАС.  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.