

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

# **ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ**

*Рекомендовано в качестве учебно-методического пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

*Составители*  
**Е.Ю. Пасечник, О.Г. Савичев, К.И. Кузеванов**

Издательство  
Томского политехнического университета  
2021

УДК 556.114+504.4(075.8)

ББК 26.22я73

Г46

Г46

**Гидрохимические основы использования и охраны водных ресурсов** : учебно-методическое пособие / сост. Е.Ю. Пасечник, О.Г. Савичев, К.И. Кузеванов ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 194 с.

ISBN 978-5-4387-0970-1

В пособии рассмотрены понятия в области гидрохимии, комплексного использования и охраны водных ресурсов. Изложены вопросы методологии и методики нормирования сбросов загрязняющих веществ в водные объекты, требования к функционированию водозаборов и очистных сооружений в части обеспечения качества потребляемой воды и оптимального состояния водных объектов.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлениям «Природообустройство и водопользование», «Прикладная геология» (специализация «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания») и «Гидрометеорология», а также специалистов в области природообустройства, водного хозяйства, геоэкологии, гидрологии, гидрогеологии, гидрохимии.

УДК 556.114+504.4(075.8)

ББК 26.22я73

*Рецензенты*

Кандидат геолого-минералогических наук  
начальник отдела государственного мониторинга за участками  
загрязнения подземных вод филиала «Сибирский региональный  
центр Государственного мониторинга состояния недр»

ФГБУ «Гидроспецгеология»

*А.А. Балобаненко*

Директор инжинирингового центра очистки  
воды и стоков «Ватерком»

*А.С. Денисюк*

ISBN 978-5-4387-0970-1

© Составление. ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2021

© Пасечник Е.Ю., Савичев О.Г.,

Кузеванов К.И., составление, 2021

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2021

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Гидрохимические основы использования и охраны водных ресурсов» представляет собой синтез понятий, подходов и методов дисциплин «Гидрохимия» и «Водоотведение и водоснабжение» с расширением за счет более глубокого изучения процессов и условий формирования химического состава атмосферных, поверхностных и подземных вод в разрезе исследований эволюции гидросферы. Соответственно, структура учебного пособия включает в себя главы, в которых рассматриваются понятия в области гидрохимии, гидрологии, водоснабжения и водоотведения.

В настоящее время в отечественной литературе понятие «гидрогеохимия» однозначно не определено, в отличие от понятия «геохимия», под которой в целом понимается научная дисциплина, исследующая химический состав Земли, распространение в ней химических элементов (на поверхности и внутри геосфер), законы их поведения, сочетания и миграции, включая круговороты [78]. Некоторыми авторами под «гидрогеохимией» понимается геохимия подземных вод – научная дисциплина на стыке гидрогеологии и геохимии. Но при использовании такого подхода возникает два вопроса: 1) следует ли понимать под «гидрохимией» геохимию поверхностных вод? 2) как называется дисциплина, целью которой является изучение химического состава всех типов природных вод, выявление закономерностей его пространственно-временных изменений и условий формирования?

Ряд других авторов придерживается той точки зрения, что гидрохимия – это химия природных вод. Соответственно, можно выделить гидрохимию речных, озерных, атмосферных и подземных вод, то есть, по сути, предлагается вместо термина «гидрогеохимия» применять термин «гидрохимия подземных вод». В то же время до сих пор непонятно, существует ли разграничение между этими терминами. По мнению составителей пособия, выход из указанных выше логических противоречий заключается в установлении тождества понятий: «геохимия вод планеты Земля, сосредоточенных в водных объектах и атмосфере, – гидрогеохимия» и «химия вод, связанных с некоторым (абстрактным) астрономическим объектом и проявляющихся в виде атмосферных и водных объектов и их более крупных образований (в том числе таких условных оболочек, как гидросфера Земли), – гидрохимия».

Возможно, и этот подход не является безупречным, но, как представляется, в настоящее время он наименее противоречив, с учётом чего и построено рассматриваемое пособие, в структуре которого выделены разделы: 1) вода, водные объекты, гидросфера; 2) состав природных вод; 3) факторы и процессы формирования химического состава природных вод; 4) формирование химического состава природных вод; 5) методика гидро-

химических исследований; 6) моделирование процессов формирования химического состава вод; 7) обеспечение качества водоподготовки и очистки сточных вод.

В первом разделе изложены основные понятия о воде, водных объектах и гидросфере, необходимые для понимания взаимосвязи геосфер и объектов, их составляющих, включая подземные воды – один из важнейших компонентов окружающей среды. Не понимая этих взаимосвязей, невозможно и понять, как формируется состав поверхностных и подземных вод, почему он характеризуется именно такими значениями физико-химических и гидрохимических показателей.

Во втором разделе даны базовые понятия о химическом составе и качестве вод, описаны наиболее важные физико-химические и гидрохимические показатели, представлена информация о классификациях вод по минерализации и химическому составу. Подобные классификации являются фактически концентрированным интегральным отражением знаний о процессах и факторах формирования химического состава природных вод. Они необходимы в том числе и для решения таких важнейших задач, как гидрогеохимические поиски полезных ископаемых, определение допустимых воздействий на водные объекты и т. д.

В третьем разделе приведена краткая характеристика факторов и процессов формирования химического состава природных вод как теоретическая основа гидрогеохимических исследований, а в четвертой – обобщённая картина формирования химического состава природных вод в их взаимосвязи с другими компонентами окружающей среды. На практике использование этих знаний требует определённого инструментария, в качестве которого в главе часто применяется аппарат математического моделирования.

В четвертом разделе основные понятия, рассмотренные во втором и третьем разделах, раскрыты применительно к конкретным водным объектам.

В пятом разделе приведены общие требования к методике гидрохимических исследований, включая методику подготовительных, полевых, лабораторных и камеральных работ, а в шестом – основные положения математического моделирования процессов формирования химического состава природных вод – наиболее сложного этапа гидрохимических исследований, по результатам которого оценивается допустимый сброс загрязняющих веществ – ключевая характеристика функционирования очистных сооружений. Наконец, в седьмом разделе рассмотрены сведения о функционировании очистных сооружений и водозаборов с учетом требований обеспечения высокого качества потребляемой воды и оптимального состояния водных объектов.

# 1. ВОДА, ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ, ГИДРОСФЕРА

## 1.1. Общие сведения о воде

Вода – химическое соединение, способное существовать в жидком (собственно вода), твёрдом (лёд, снег) и газообразном (водяной пар) состояниях в зависимости от параметров, определяемых правилом фаз Гиббса:

$$F = m - n + 2, \quad (1.1)$$

где  $F$  – число степеней свободы, то есть число независимых параметров, определяющих равновесие системы (температура и/или давление);  $m$  – число компонент;  $n$  – число фаз. Переход воды из жидкого состояния в газообразное называется испарением, из газообразного в жидкое – конденсацией, из твёрдого в газообразное – возгонкой, из газообразного в твёрдое – сублимацией, из жидкого в твёрдое – кристаллизацией, из твёрдого в жидкое – плавлением. При температуре 273,16 К и давлении 610 Па (тройная точка) вода может находиться одновременно в трёх агрегатных состояниях. В реальных растворах воды ситуация осложняется скоростью изменения температуры, давления и составом растворов, что в результате определяет возможность существования переохлаждённой и перегретой жидкости. Молекула воды образована атомами водорода и кислорода и имеет структуру равнобедренного треугольника, в вершине которого расположен атом кислорода, а в основании – два атома водорода. Состав молекулы воды из двух атомов водорода и одного атома кислорода обеспечивает наличие в ней трех электрических центров: двух положительных и одного отрицательного. Благодаря такому строению каждая молекула воды в состоянии образовать четыре водородных связи (рис. 1.1). В классических учебниках приводят следующие расстояния между отдельными атомами в молекулах воды, соединенных водородной связью:  $O-H = 0,0976$  нм и  $H-O = 0,176$  нм, т. е. водородная связь оказывается длиннее химической на 70 %. Угол связи, образованный двумя атомами водорода  $H-O-H$ , равный  $107,2^\circ$  (рис. 1.2), близок к углу тетраэдра. Поэтому молекулу воды уподобляют тетраэдру, два угла которого заряжены положительно, а два – отрицательно [121].

Необходимо отметить, что вода – это смесь различных изотопов водорода ( $^1H$ ,  $^2H$ ,  $^3H$ ) и кислорода ( $^{16}O$ ,  $^{17}O$ ,  $^{18}O$ ), среди которых преобладают  $^1H$  и  $^{16}O$ . Соответственно, данные изотопы формируют 99,73 % водных ресурсов планеты [3, 9].

Для каждого агрегатного состояния характерны свои особенности расположения молекул воды (её структуры): 1) водяной пар не имеет

структуры, он состоит преимущественно из мономерных молекул воды; 2) в твердом состоянии (в виде льда) молекулы воды в высокой степени упорядочены; при атмосферном давлении кристаллы льда относятся к гексагональной системе, а в структуре кристаллов много пустот, размеры которых превышают размеры самих молекул; 3) жидкая вода занимает промежуточное положение между паром и льдом; невозможность точно определить структуру жидкой воды с помощью современных методов исследования привела к возникновению множества теорий её строения; в большинстве теорий в качестве отправной точки используется структура льда [108].

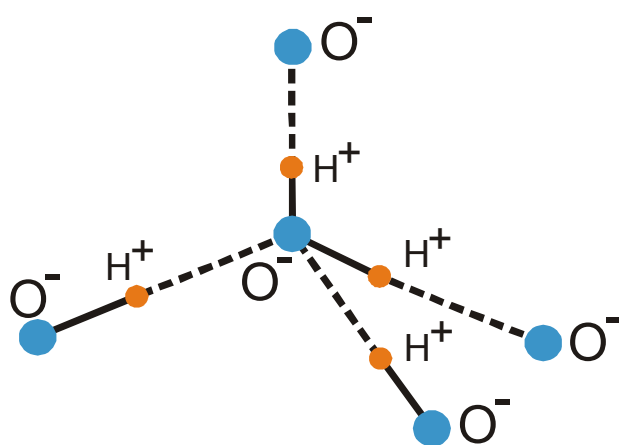


Рис. 1.1. Тетраэдрический характер водородных связей

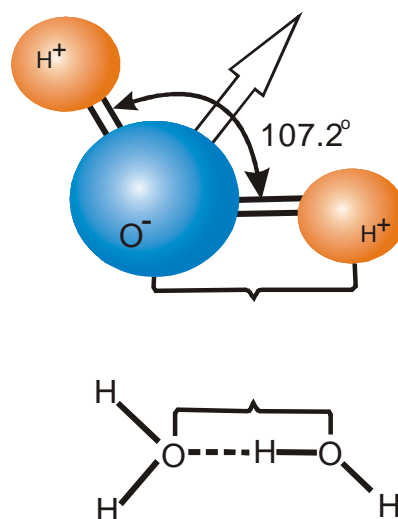


Рис. 1.2. Межъядерные расстояния и угол связи в воде

Изменение структурных особенностей воды под действием внешних факторов имеет большое значение. Очевидно, с изменением структурных особенностей воды связан так называемый эффект активирования, впервые установленный Ф.А. Летниковым и соавторами, показавшими, что вода и водные растворы после прогрева при высоких значениях температуры и давления в течение некоторого времени находятся в метастабильном состоянии. Метастабильная вода характеризуется повышенной растворяющей способностью по отношению к карбонатам, сульфатам, оксидам и силикатам; она имеет пониженные значения рН и длительное время удерживает в своём составе аномальные количества растворённого вещества [108].

Вода – одно из самых удивительных соединений на Земле – аномальна по многим физическим свойствам: ей свойственна высокая (относительно расчётной) температура плавления (для льда) и кипения, расширение при замерзании, сильные растворяющие свойства, ис-

ключительно высокая диэлектрическая проницаемость, необычность зависимости её вязкости от давления, высокая удельная теплота испарения и плавления, высокое поверхностное натяжение, низкая электролитическая диссоциация, высокая термическая устойчивость и многое другое [108].

## 1.2. Гидросфера и составляющие её водные объекты

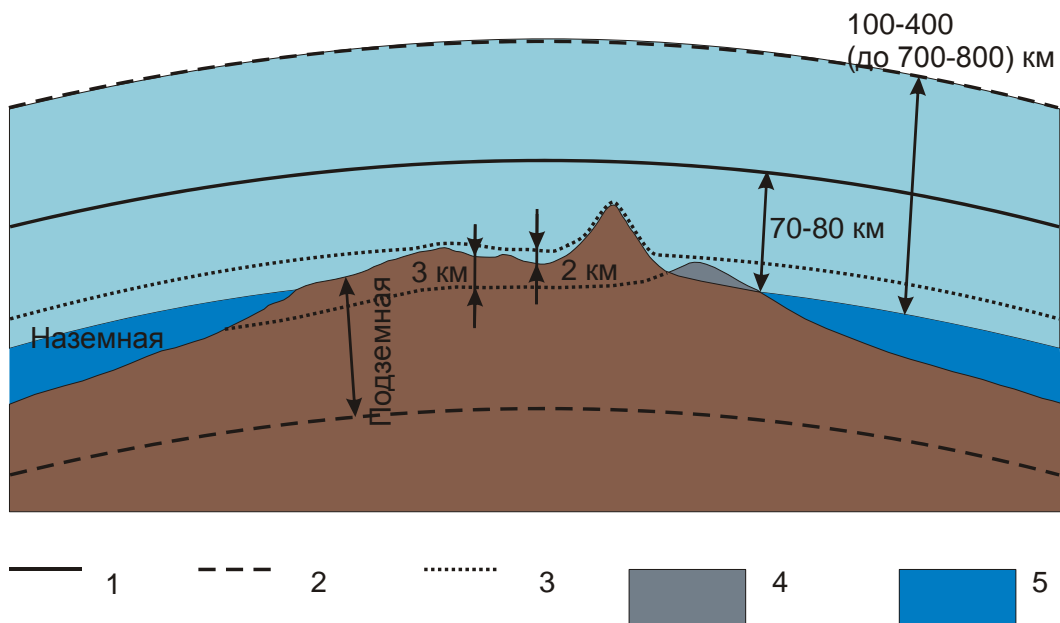
В зависимости от преобладающего агрегатного состояния вещества на планетарном уровне можно условно выделить концентрические слои – литосферу, атмосферу и гидросферу (степень преобладания может быть определена на основе анализа базовых свойств – наличия кристаллической решетки и межмолекулярных взаимодействий, постоянства объёма и формы [51]). Кроме того, нижняя часть атмосферы, вся гидросфера и верхняя часть литосферы, населённые живыми организмами, совокупная деятельность которых проявляется, согласно В.И. Вернадскому, как геохимический фактор планетарного масштаба, называется биосферой, а биосфера на стадии цивилизованного человечества – ноосферой [8, 78]. Главный объект исследований в гидрогеохимии – гидросфера, в связи с чем рассмотрим некоторые базовые понятия о гидросфере и водных объектах.

*Гидросфера* – совокупность всех вод Земли (поверхностных, подземных, ледников), одна из оболочек земного шара, охватывающая пространство от атмосферы до мантии (рис. 1.3). По массе гидросфера сопоставима с половиной массы литосферы. При этом вода может находиться в различном физическом состоянии – твердом, жидком, парообразном, флюидальном (при высоких значениях давлений, температур и газонасыщенности). Пронизывая другие земные оболочки, она обуславливает их взаимосвязь между собой, миграцию химических элементов, формирование и разрушение различных видов полезных ископаемых (руд, солей, нефти и др.). Общие запасы воды на Земле составляют около 1388 млн км<sup>3</sup>. Запас воды в руслах рек равен 2120 км<sup>3</sup>, в пресных озерах – 91 тыс. км<sup>3</sup>. Запас пресных подземных вод оценивается в 10,5 млн км<sup>3</sup>, а общие запасы пресных вод – в 35 млн км<sup>3</sup>, что составляет 2,53 % от общего объёма гидросферы.

Вода находится в непрерывном движении. Она все время расходуется и восстанавливается в процессе *круговорота воды в природе*, под которым, согласно [24], понимается непрерывный процесс циркуляции воды на земном шаре, происходящий под влиянием солнечной радиации и силы тяжести. Ежегодно с поверхности Земли испаряется 577 тыс. км<sup>3</sup> воды. Большая часть (505 тыс. км<sup>3</sup>) приходится на Мировой океан и

меньшая (72 тыс. км<sup>3</sup>) – на сушу. Пары, попадая в атмосферу, при определенных условиях конденсируются, образуя осадки, которые выпадают на земную поверхность в виде дождя, снега, града и т. п. Выпавшие на сушу осадки просачиваются в почву и питают грунтовые воды, стекают по склонам местности, образуя временные и постоянные водотоки, а оставшаяся часть их снова испаряется.

Отмечают два вида круговорота воды: 1) малый, или океанический, круговорот, когда испарившаяся с поверхности океанов и морей влага не переносится на сушу, а, поднявшись вверх, конденсируется и возвращается непосредственно в моря и океаны в виде атмосферных осадков; 2) большой круговорот – это процесс перемещения воздушными течениями на материках водяных паров и их выпадение в виде осадков на поверхность суши, а затем возвращение в моря и океаны поверхностным или подземным путем.



*Рис. 1.3. Структура гидросферы [121]:*

- 1 – установленная граница распространения гидросферы (70...80 км);
- 2 – предполагаемые верхняя и нижняя границы (100...400 км и более);
- 3 – границы биосферы; 4 – криосфера; 5 – Мировой океан

Небольшая часть водяных паров, поступающих с поверхности океанов, выпадает в виде осадков в бессточные области суши. Объемы и скорость перемещения отдельных видов воды неодинаковы. В пределах нашей планеты обычно рассматриваются следующие типы влагооборота: между землей и космосом, между атмосферой и океаном, между океаном и сушей, между атмосферой, почвенным покровом и биосферой. По существу, все типы влагооборота являются незамкнутыми.



Основной закономерностью круговорота воды в природе является водообмен между океаном и сушей. Одновременно он дает начало другим частным звеньям общего круговорота. Различные виды круговорота вод в процессе их перемещения взаимосвязаны. Поскольку скорость потоков воды в процессе её перемещения неодинакова, то и время расходования и возобновления водных ресурсов также различно (табл. 1.1). Оно колеблется в широких пределах: от нескольких часов (биологическая вода) до нескольких тысячелетий (ледники и подземные воды).

Таблица 1.1

*Запасы воды на земном шаре (приводится по [61])*

Виды природных вод	Площадь, млн км <sup>2</sup>	Объём, тыс. км <sup>3</sup>	Доля в мировых запасах, %		Средний период условного возобновления запасов воды
			общих	пресных вод	
<b>Вода на поверхности литосферы</b>					
Мировой океан	361	1338000	96,4	–	2650 лет
Ледники и постоянный снежный покров	16,25	25780	1,86	70,2	9700 лет
Озёра, всего	2,1	176	0,013	–	17 лет
в т. ч. пресные	1,2	91	0,007	0,25	–
Водохранилища	0,4	6	0,0004	0,016	52 дня
Реки	–	2	0,0002	0,005	19 дней
Болота	2,7	11	0,0008	0,03	5 лет
<b>Вода в верхней части литосферы</b>					
Подземные воды, всего	–	23400	1,68	–	1400 лет
в т. ч. пресные	–	10530	0,76	28,7	–
Подземные льды зоны многолетнемерзлых пород	2,1	300	0,022	0,82	10000 лет
<b>Вода в атмосфере и в организмах</b>					
В атмосфере	–	13	0,001	0,04	8 дней
В организмах	–	1	0,0001	0,003	Несколько часов
<b>Общие запасы воды</b>					
Общие запасы воды, всего	–	1388000	100	–	–
в т. ч. пресные	–	36730	2,65	100	–

Количественная характеристика круговорота воды в природе определяется водным балансом – соотношением прихода и расхода воды с учетом изменения её запасов за выбранный интервал времени для рассматриваемого объекта. При этом водный баланс может быть рассчитан для водосбора или участка территории, для водного объекта, материка и т. д.

Математическое выражение, описывающее водный баланс, называется уравнением водного баланса, а элементами водного баланса – составляющие уравнения водного баланса, характеризующие приход, расход и изменения запасов воды. Например, в случае водного баланса речного бассейна (при отсутствии притока воды извне) в качестве приходной части рассматриваются атмосферное увлажнение  $X$ , а в качестве расходной – испарение  $E$  и суммарный сток  $Y$  (поверхностный  $Y_s$  и подземный  $Y_g$ ).

$$U = X - Y - E, \quad (1.2)$$

где  $U$  – изменение влагозапасов в бассейне. В общем случае атмосферное увлажнение складывается из жидких атмосферных осадков  $X_r$  и водоотдачи из снежного покрова  $X_s$  ( $X = X_r + X_s$ ).

Гидросфера состоит из природных вод (воды Земли с содержащимися в них твёрдыми, жидкими и газообразными веществами) и *водных объектов* – сосредоточия воды на поверхности суши в формах ее рельефа либо в недрах, имеющих границы, объём и черты режима (гидрологический режим – совокупность закономерно повторяющихся изменений состояния водного объекта, присущих ему и отличающих его от других водных объектов; водный режим – составная часть гидрологического режима – изменение во времени уровней, расходов и объёмов воды в водных объектах и почвогрунтах [24]; гидрохимический режим – изменение химического состава воды водного объекта во времени [27] и т. д.). Согласно [12], водные объекты в зависимости от особенностей их режима, физико-географических, морфометрических и других особенностей подразделяются: 1) на поверхностные водные объекты; 2) подземные водные объекты. Атмосферные воды к поверхностным и подземным водам не относятся (согласно [31], дождевая вода – это вода, образованная из атмосферных осадков, в которую еще не поступили растворимые вещества из поверхностного слоя земли).

К поверхностным водным объектам относятся:

1) моря или их отдельные части (проливы, заливы, в том числе бухты, лиманы и другие); согласно [31], море – крупный естественный водоем, являющийся частью океана, обособленный сушей или возвышениями подводного рельефа и отличающийся от океана физико-географическими особенностями, а морская воды – это вода, сосредоточенная в морях и океанах;

2) водотоки (река – водоток значительных размеров, питающийся атмосферными осадками со своего водосбора и имеющий четко выраженное русло [24]; ручей – небольшой водоток, образованный снеговыми, дождевыми водами, а также выходящими на поверхность подземными водами [31]; каналы);

- 3) водоёмы (озера, пруды, обводненные карьеры, водохранилища);
- 4) болота (природное образование, занимающее часть земной поверхности и представляющее собой отложения торфа, насыщенные водой и покрытые специфической растительностью [24]);
- 5) природные выходы подземных вод (родники, гейзеры; согласно [31], родник – это естественный сосредоточенный выход подземной воды на поверхность земли);
- 6) ледники (согласно [31], ледник – это движущееся естественное скопление льда и фирна на земной поверхности, возникающее в результате накопления и преобразования твердых атмосферных осадков при положительном многолетнем балансе), снежники.

Поверхностные водные объекты состоят из поверхностных вод и покрытых ими земель в пределах береговой линии (границы водных объектов), которая определяется для: 1) моря – по постоянному уровню воды, а в случае периодического изменения уровня воды – по линии максимального отлива; 2) реки, ручья, канала, озера, обводненного карьера – по среднемноголетнему уровню вод в период, когда они не покрыты льдом; 3) пруда, водохранилища – по нормальному подпорному уровню воды; 4) болота – по границе залежи торфа на нулевой глубине [12].

К подземным водным объектам (сосредоточениям находящихся в гидравлической связи вод в горных породах, имеющих границы, объем и черты водного режима) относятся: 1) водоносные горизонты – воды, сосредоточенные в трещинах и пустотах горных пород и находящиеся в гидравлической связи; 2) бассейны подземных вод – совокупность водоносных горизонтов, расположенных в недрах. Кроме того, выделяют месторождения подземных вод – части водоносного горизонта, в пределах которого имеются благоприятные условия для извлечения подземных вод [12].

Согласно [31], подземная вода – это вода, в том числе минеральная (природная подземная вода, характеризующаяся постоянным ионно-солевым составом, содержанием биологически активных компонентов и специфическими свойствами; минеральные воды чаще всего обладают повышенным солесодержанием и могут обладать лечебным действием), находящаяся в подземных водных объектах. По условиям залегания, по классификации А.М. Овчинникова, выделяются три основных типа (верховодка, грунтовые, артезианские) и несколько подтипов в зависимости от приуроченности подземных вод к породам, в которых движение воды осуществляется по порам (обычно рыхлым осадочным породам) или трещинам (скальным породам). При этом под верховодкой понимается первый от поверхности временно существующий горизонт, залегающий в зоне аэрации (верхняя зона земной оболочки между дневной поверхностью и зеркалом грунтовых вод) на водоупорах ограни-

ченного размера; под грунтовыми водами – воды первого от поверхности постоянно существующего водоносного горизонта, залегающего в зоне полного насыщения; под артезианскими водами – подземные воды, кроме первого от поверхности водоносного горизонта, залегающие между водоупорными слоями и имеющие напор [122]. Согласно [31], артезианская вода – это напорная подземная вода, заключенная в глубоких водоносных пластах между водонепроницаемыми слоями.

Классификацию всех водных объектов, включая подземные, производят по основным признакам, характеристикам, категориям, отражающим природные особенности водного объекта, учитываемым при его использовании и охране и выражаемым качественными (сравнительными) и количественными показателями [18]. К основным признакам, характеризующим особенности водных объектов, относят: 1) физико-географические (общие); 2) режимные (водный, ледовый, термический); 3) морфометрические. Признак водного объекта выражается набором характеристик: площадь (водосбора, водного зеркала и пр.), длина, глубина; расход и объем воды, скорость течения; уровень воды; температура воды; длительность неблагоприятных по водности и условиям водообмена периодов (межень, ледостав, отсутствие стока и т. п.); показатели условий водообмена; фильтрационные свойства почв и горных пород. Каждая характеристика подразделяется на категории, показывающие различие в размерах объекта или условиях режима, водообмена и пр. Классификация поверхностных природных вод по общим признакам и бассейнов, месторождений подземных вод водоносных горизонтов по их размеру и водности приведена в табл. 1.2, классификация подземных вод по характеру водообмена – в табл. 1.3, по некоторым режимным характеристикам – в табл. 1.4.

Таблица 1.2

*Категории водотоков и водоёмов [18]*

Водный объект	Характеристика	Категория				
		очень большая	большая	средняя	малая	очень малая
Водотоки	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	–	>50000	20000–50000	200–20000	≤200
	Средний многолетний расход воды за период низкого стока, м <sup>3</sup> /с	–	>100	5–100	2–5	≤2
	Разница высшего и низшего уровней воды в сезон низкого стока за многолетний период, м	–	>2	1–2	≤1	–

Водный объект	Характеристика	Категория				
		очень большая	большая	средняя	малая	очень малая
	Средняя многолетняя скорость течения за период низкого стока, м/с	–	>1,0	0,2–1,0	≤0,2	–
Водоёмы	Площадь поверхности, км <sup>2</sup>	>1000	101–1000	10–100	≤10	–
	Полный объем, км <sup>3</sup>	>10,0	1,1–10,0	0,5–1,0	≤0,5	–
	Максимальная глубина, м	–	>50	11–50	5–10	≤5
	Колебание уровня <sup>1</sup> воды, м	–	>20	3–20	≤3	–
Моря	Площадь поверхности, тыс. км <sup>2</sup>	>1500	601–1500	100–600	≤100	–
	Объём, тыс. км <sup>3</sup>	>1000	151–1000	10–150	≤10	–
	Максимальная глубина, м	>1000	501–1000	50–500	≤50	–
	Разница между максимальными и минимальными уровнями воды, м	–	>5	2–5	≤2	–
Подземные воды	Площадь, км <sup>2</sup>	–	>1000	100–1000	<100	–
	Мощность, м	–	>100	10–100	<10	–
	Подземный сток, м <sup>3</sup> /с	–	>100	10–100	<10	–

*Примечание:* для озер – разница между наивысшими и наинизшими уровнями воды за многолетний период; для водохранилищ многолетнего регулирования – разница между наивысшими и наинизшими уровнями воды за средний по водности водохозяйственный год; для водохранилищ сезонного, недельного и суточного регулирования – разность уровней ежегодной сработки; приведены категории бассейнов, месторождений и водоносных горизонтов подземных вод.

Таблица 1.3

*Классификация подземных вод по характеру водообмена [18]*

Характер залегания вод	Тип вод по условиям циркуляции	Соотношение области питания и области распространения	Гидравлическая связь с дренами	Гидродинамическая связь водоносных горизонтов	Водообмен
Открытый	Трещинно-карст.	Совпадает	Постоянная	Явная	Активный
Наличие «гидрологических окон»	Трещинный	–	Периодическая	Неявная	Замедленный
Изолированный	Поровый	Частично совпадает	Отсутствует	Отсутствует	Весьма замедленный

Таблица 1.4

*Классификация подземных вод по режимным характеристикам [19]*

Естественная скорость течения		Температура воды	
Категория	Значение, м/с	Категория	Значение, °С
Малая	До 0,02	Холодная	До 20
Средняя	Свыше 0,02 до 0,1	Теплая	Св. 20 до 35
Большая	Свыше 0,1	Горячая	Св. 35 до 42
–	–	Очень горячая	Св. 42

**Контрольные вопросы и задания**

1. Дайте определение понятий «вода», «водный объект», «гидросфера», «круговорот воды в природе».
2. Сформулируйте уравнения водного баланса планеты Земля, океана, речного бассейна. Какие вы знаете элементы уравнения водного баланса и соответствующие им единицы измерения?
3. Дайте определение понятий «поверхностные» и «подземные водные объекты». Назовите виды водных объектов.
4. Что такое гидрологический режим? Назовите составляющие гидрологического режима.

## 2. СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД

### 2.1. Химический состав вод, физико-химические и гидрохимические показатели

Согласно [1], в природе нет абсолютно нерастворимых веществ. Все они в той или иной степени подвергаются воздействию воды, отличаясь друг от друга только количеством переходящего в раствор вещества. Все горные породы постепенно разрушаются водой, обогащая ее растворимыми веществами. Поэтому в *естественном состоянии вода* всюду представляет собой сложный раствор различных веществ, который принято называть *природной водой* в отличие от химически чистой воды  $H_2O$ . Сложность веществ, находящихся в природе, отражается на составе природных вод. Соприкасаясь в своем круговороте с огромным числом разнообразных минералов, газов и органических веществ, природная вода включает в свой состав значительное число химических соединений. В настоящее время определено уже большинство химических элементов периодической системы, находящихся в природной воде. Нет сомнений, что при дальнейшем усовершенствовании чувствительности методов химического анализа в природных водах будут определены все присутствующие на Земле в естественном состоянии химические элементы.

Природные воды по химическому составу чрезвычайно разнообразны. Встречаются более или менее сходные по составу воды, но никогда не бывает совершенно одинаковых. Они отличаются не только по химическим элементам и общей концентрации растворенных веществ, но и по количественному соотношению между компонентами состава и форме их соединений. В состав воды входят газы, главным образом в виде молекул и частично гидратированных соединений, соли, преимущественно в виде ионов, а при больших концентрациях комплексов и молекул – органические вещества как в молекулярных и высокомолекулярных соединениях, так и в коллоидном состоянии. Сложность состава природных вод подтверждается хотя бы тем, что один и тот же элемент может находиться в воде в различных соединениях и состояниях.

В целом под *химическим составом природных вод*, согласно [27], понимается совокупность находящихся в воде веществ в различных химических и физических состояниях (по О.А. Алекину [1] – весь сложный комплекс минеральных и органических веществ, находящихся в разных формах ионно-молекулярного и коллоидного состояния). С некоторой условностью химический состав природных вод можно разделить на сле-

дующие пять групп: *главные ионы*, т. е. ионы, содержащиеся в наибольшем количестве (хлоридные  $\text{Cl}^-$ , сульфатные  $\text{SO}_4^{2-}$ , гидрокарбонатные  $\text{HCO}_3^-$ , карбонатные  $\text{CO}_3^{2-}$ , натрия  $\text{Na}^+$ , калия  $\text{K}^+$ , магния  $\text{Mg}^{2+}$  и кальция  $\text{Ca}^{2+}$ ); *растворенные газы* (кислород  $\text{O}_2$ , азот  $\text{N}_2$ , двуокись углерода  $\text{CO}_2$ , сероводород  $\text{H}_2\text{S}$  и др.); *биогенные элементы* (соединения азота, фосфора, кремния); *микроэлементы* – соединения всех остальных химических элементов; *органические вещества*. Несколько особое положение занимают ионы водорода  $\text{H}^+$ , находящиеся в природных водах в очень небольшом количестве, но играющие очень большую роль в химических и биологических процессах, протекающих в природных водах. Деление на эти группы в известной мере условно, так как некоторые элементы, например кальций, калий, также усваиваются и необходимы организмам, как и биогенные элементы, а концентрации биогенных элементов часто бывают еще меньше, чем микроэлементов [1].

Помимо изучения концентраций конкретных веществ обычно проводится определение ряда косвенных и/или интегральных показателей, краткая характеристика которых приведена ниже.

**Минерализация.** Согласно [15], в отечественной литературе широко распространен термин *минерализация воды*, под которым понимают сумму всех найденных при анализе минеральных веществ в  $\text{мг/дм}^3$  или промилле (г/кг, при сумме больше одного г/кг), содержащихся в данной воде. Согласно [27], минерализация – это суммарная концентрация анионов, катионов и недиссоциированных растворенных в воде неорганических веществ, выражающаяся в  $\text{г/дм}^3$ . Минерализация как *количественная характеристика* состава воды носит условный характер, так как полнота анализа вод может быть различна, так же как и форма выражения его результатов (особенно для тяжелых металлов). В океанологической практике вместо минерализации употребляется термин *соленость*. Кроме минерализации, существует еще близкое к ней по величине понятие *сумма ионов*  $\Sigma_{\text{и}}$ , т. е. сумма всех видов ионов в  $\text{мг/дм}^3$  или г/кг, концентрация которых больше  $0,1 \text{ мг/дм}^3$ .

Минерализация природных вод, определяющая их удельную электропроводность, изменяется в широких пределах. Большинство рек имеет минерализацию воды от нескольких десятков в 1 л до нескольких сотен миллиграммов. Их удельная электропроводность варьирует от 30 до 1500 мкСм/см. Минерализация подземных вод и соленых озер изменяется от  $40 \dots 50 \text{ мг/дм}^3$  до 650 г/кг (плотность в этом случае уже значительно отличается от единицы). Удельная электропроводность атмосферных осадков (с минерализацией от 3 до  $60 \text{ мг/дм}^3$ ) составляет  $20 \dots 120 \text{ мкСм/см}$ .



Многие промышленные производства, сельское хозяйство, предприятия питьевого водоснабжения предъявляют определенные требования к качеству вод (в частности, к минерализации), так как воды, содержащие большое количество солей, отрицательно влияют на растительные и животные организмы, технологию производства и качество продукции, вызывают образование накипи на стенках котлов, коррозию, засоление почв.

**Электропроводность.** Электропроводность (согласно [31], удельная электропроводность воды – электропроводность единицы объема воды) – это численное выражение способности водного раствора проводить электрический ток. Электрическая проводимость природной воды зависит в основном от концентрации растворенных минеральных солей и температуры. Природные воды представляют в основном смешанные растворы сильных электролитов. Минеральную часть воды составляют ионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ . Этими ионами и обуславливается электропроводность природных вод. Присутствие других ионов (например,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) не сильно влияет на электропроводность, если эти ионы не содержатся в воде в значительных количествах (например, ниже выпусков производственных или хозяйственно-бытовых сточных вод). По значениям электропроводности природной воды можно приближенно судить о минерализации воды с помощью предварительно установленных зависимостей.

Затруднения, возникающие при оценке суммарного содержания минеральных веществ (минерализации) по удельной электропроводности, связаны с неодинаковой удельной электропроводностью растворов различных солей, а также с повышением электропроводности при увеличении температуры. Величина удельной электропроводности служит приблизительным показателем суммарной концентрации электролитов, главным образом неорганических, и используется в программах наблюдений за состоянием водной среды для оценки минерализации вод. Удельная электропроводность – удобный суммарный индикаторный показатель антропогенного воздействия.

**Температура.** Температура воды в водоеме является результатом нескольких одновременно протекающих процессов, таких как солнечная радиация, испарение, теплообмен с атмосферой, перенос тепла течениями, турбулентным перемешиванием вод и др. Обычно прогревание воды происходит сверху вниз. Годовые и суточные изменения температуры воды на поверхности и глубинах определяются количеством тепла, поступающего на поверхность, а также интенсивностью и глубиной перемешивания. Суточные колебания температуры могут составлять несколько градусов и обычно наблюдаются на небольшой глубине. На мелково-

дье амплитуда колебаний температуры воды близка к перепаду температуры воздуха.

Температура воды – важнейший фактор, влияющий на протекающие в водоеме физические, химические, биохимические и биологические процессы, от которого в значительной мере зависят кислородный режим и интенсивность процессов самоочищения. Значения температуры используют для вычисления степени насыщения воды кислородом, различных форм щелочности, состояния карбонатно-кальциевой системы, при многих гидрохимических, гидробиологических, особенно лимнологических исследованиях, при изучении тепловых загрязнений.

**Взвешенные вещества (грубодисперсные примеси).** Согласно [31], взвешенные вещества – вещества, выделенные из воды путем фильтрования и (или) центрифугирования (по [99], взвешенные вещества – показатель, характеризующий количество примесей, которое задерживается на бумажном фильтре при фильтровании пробы). По [15], взвешенные твердые вещества, присутствующие в природных водах, состоят из частиц глины, песка, ила, суспендированных органических и неорганических веществ, планктона и различных микроорганизмов. Концентрация взвешенных частиц связана с сезонными факторами и режимом стока, зависит от пород, слагающих русло, а также от антропогенных факторов, таких как сельское хозяйство, горные разработки и т. п. Взвешенные частицы влияют на прозрачность воды и на проникновение в нее света, на температуру, состав растворенных компонентов поверхностных вод, адсорбцию токсичных веществ, а также на состав и распределение отложений и на скорость осадкообразования. Вода, в которой много взвешенных частиц, не подходит для рекреационного использования по эстетическим соображениям.

Определение количества взвешенных частиц важно проводить при контроле процессов биологической и физико-химической обработки сточных вод и при оценке состояния природных водоемов. Грубодисперсные примеси определяют гравиметрическим методом после их отделения путем фильтрования через фильтр «синяя лента» (преимущественно для проб с прозрачностью менее 10 см).

**Запах.** Свойство воды вызывать у человека и животных специфическое раздражение слизистой оболочки носовых ходов называют «запах». Он характеризуется интенсивностью, которую измеряют в баллах. Запах воды вызывают летучие пахнущие вещества, поступающие в воду в результате процессов жизнедеятельности водных организмов, при биохимическом разложении органических веществ, при химическом взаимодействии содержащихся в воде компонентов, а также с промышленными, сельскохозяйственными и хозяйственно-бытовыми сточными

водами. На запах воды оказывают влияние состав содержащихся в ней веществ, температура, значения рН, степень загрязненности водного объекта, биологическая обстановка, гидрологические условия и т. д.

**Мутность.** Согласно [27], мутность – это показатель, характеризующий уменьшение прозрачности воды в связи с наличием тонкодисперсных взвешенных частиц (по [15], мутность природных вод вызвана присутствием тонкодисперсных примесей, обусловленных нерастворимыми или коллоидными неорганическими и органическими веществами различного происхождения). Качественное определение проводят описательно: слабая опалесценция, опалесценция, слабая, заметная и сильная муть. Мутность воды определяют турбидиметрически (по ослаблению проходящего через пробу света) путем сравнения проб исследуемой воды со стандартными суспензиями. Результаты измерений выражают в мг/дм<sup>3</sup> (при использовании основной стандартной суспензии каолина) или в ЕМ/дм<sup>3</sup> (единицы мутности на 1 дм<sup>3</sup> при использовании основной стандартной суспензии формазина); 1,5 мг/дм<sup>3</sup> каолина соответствует 2,6 ЕМ/дм<sup>3</sup> формазина. Турбидиметрическое определение предназначено для вод, имеющих переменчивый состав и форму тонкодисперсных примесей. Если пробу предварительно не профильтровать, то турбидиметрически будут определены не только коллоидные, но и более грубодисперсные частицы [Гидрохимические показатели..., 2007].

**Цветность.** Согласно [27], прозрачность – это показатель, характеризующий интенсивность окраски воды (окраска воды – это показатель, характеризующий наличие веществ, вызывающих окрашивание воды). По [15] цветность выражается в градусах платиново-кобальтовой шкалы. Определяется путем сравнения окраски испытуемой воды с эталонами. Цветность природных вод обусловлена, главным образом, присутствием гумусовых веществ и соединений трехвалентного железа. Количество этих веществ зависит от геологических условий, водоносных горизонтов, характера почв, наличия болот и торфяников в бассейне реки и т. п. Сточные воды некоторых предприятий также могут создавать довольно интенсивную окраску воды. Цветность природных вод варьирует от нескольких единиц до нескольких тысяч градусов.

Различают «истинный» цвет, обусловленный только растворенными веществами, и «кажущийся» цвет, вызванный присутствием в воде коллоидных и взвешенных частиц, соотношение между которыми в значительной мере определяется величиной рН. Высокая цветность воды ухудшает ее органолептические свойства и оказывает отрицательное влияние на развитие водных растительных и животных организмов в результате резкого снижения концентраций растворённого кислорода

в воде, который расходуется на окисление соединений железа и гумусовых веществ [15].

**Прозрачность.** Согласно [27], прозрачность – это показатель, характеризующий способность воды пропускать световые лучи. По [15] прозрачность (или светопропускание) природных вод обусловлена их цветом и мутностью, т. е. содержанием в них различных окрашенных и взвешенных органических и минеральных веществ. В зависимости от степени прозрачности, воду условно подразделяют на прозрачную, слабоопалесцирующую, опалесцирующую, слегка мутную, мутную и сильно мутную. Мерой прозрачности служит высота столба воды, при которой можно наблюдать опускаемую в водоем белую пластину определенных размеров (диск Секки) или различать на белой бумаге шрифт определенного размера и типа (как правило, шрифт средней жирности высотой 3,5 мм). Результаты выражаются в сантиметрах с указанием способа измерения.

Ослабление интенсивности света с глубиной в мутной воде приводит к большему поглощению солнечной энергии вблизи поверхности. Появление более теплой воды у поверхности уменьшает перенос кислорода из воздуха в воду, снижает плотность воды, стабилизирует стратификацию. Уменьшение потока света также снижает эффективность фотосинтеза и биологическую продуктивность водоема. Определение прозрачности воды – обязательный компонент программ наблюдений за состоянием водных объектов. Увеличение количества грубодисперсных примесей и мутности характерно для загрязненных и эвтрофных водоемов [15].

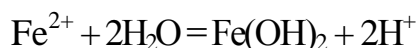
**Водородный показатель (рН).** Содержание ионов водорода (гидроксония –  $\text{H}_3\text{O}^+$ ) в природных водах определяется в основном соотношением концентраций угольной кислоты и ее ионов:



Для удобства выражения содержания водородных ионов была введена величина, представляющая собой логарифм их концентрации, взятый с обратным знаком:

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$$

Для поверхностных вод, содержащих небольшие количества диоксида углерода, характерна щелочная реакция. Изменения рН тесно связаны с процессами фотосинтеза (при потреблении  $\text{CO}_2$  водной растительностью высвобождаются ионы  $\text{OH}^-$ ). Источником ионов водорода являются также гумусовые кислоты, присутствующие в почвах. Гидролиз солей тяжелых металлов играет роль в тех случаях, когда в воду попадают значительные количества сульфатов железа, алюминия, меди и других металлов:



Значение рН в речных водах обычно варьирует в пределах 6,5...8,5, в атмосферных осадках – 4,6...6,1, в болотах – 5,5...6,0, в морских водах – 7,9...8,3. Концентрация ионов водорода подвержена сезонным колебаниям. Зимой величина рН для большинства речных вод составляет 6,8...7,4, летом – 7,4...8,2. На величину рН природных вод влияет и геология водосборного бассейна.

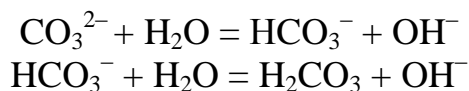
Величина рН воды – один из важнейших показателей качества вод. Величина концентрации ионов водорода имеет большое значение для химических и биологических процессов, происходящих в природных водах. От величины рН зависят развитие и жизнедеятельность водных растений, устойчивость различных форм миграции элементов, агрессивное действие воды на металлы и бетон. Величина рН воды также влияет на процессы превращения различных форм биогенных элементов, изменяет токсичность загрязняющих веществ.

**Окислительно-восстановительный потенциал (Eh).** Eh – мера химической активности элементов или их соединений в обратимых химических процессах, связанных с изменением заряда ионов в растворах. Значения окислительно-восстановительных (редокс) потенциалов выражаются в вольтах (милливольтах). Изучение редокс-потенциала позволяет выявить природные среды, в которых возможно существование химических элементов с переменной валентностью в определенной форме, а также выделить условия, при которых возможна миграция металлов. В природной воде значение Eh колеблется от –400 до +700 мВ, определяется всей совокупностью происходящих в ней окислительных и восстановительных процессов и в условиях равновесия характеризует среду сразу относительно всех элементов, имеющих переменную валентность.

Различают несколько основных типов геохимической обстановки в природных водах: 1) *окислительная обстановка* – характеризуется значениями Eh +(100...150) мВ, присутствием свободного кислорода, а также целого ряда элементов в высшей форме своей валентности ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mo}^{6+}$ ,  $\text{As}^{5-}$ ,  $\text{V}^{5+}$ ,  $\text{U}^{6+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{4+}$ ); 2) *переходная окислительно-восстановительная обстановка* – определяется величинами Eh +(100...0) мВ, неустойчивым геохимическим режимом и переменным содержанием сероводорода и кислорода (в этих условиях протекает как слабое окисление, так и слабое восстановление целого ряда металлов); 3) *восстановительная обстановка* – характеризуется отрицательными значениями Eh; в подземных водах присутствуют металлы низких степеней валентности ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mo}^{4+}$ ,  $\text{V}^{4+}$ ,  $\text{U}^{4+}$ ), а также сероводород.

**Кислотность.** Кислотность природных и сточных вод определяется их способностью связывать гидроксид-ионы. Расход гидроксида отражает общую кислотность воды. В обычных природных водах кислотность в большинстве случаев зависит только от содержания свободного диоксида углерода. Естественную часть кислотности создают также гуминовые и другие слабые органические кислоты и катионы слабых оснований (ионы аммония, железа, алюминия, органических оснований). В этих случаях рН воды не бывает ниже 4,5. В загрязненных водоемах может содержаться большое количество сильных кислот или их солей за счет сброса промышленных сточных вод. В этих случаях рН может быть ниже 4,5. Часть общей кислотности, снижающей рН до величин <4,5, называется свободной кислотностью.

**Щелочность.** Под щелочностью природных или очищенных вод понимают способность некоторых их компонентов связывать эквивалентное количество сильных кислот. Щелочность обусловлена наличием в воде анионов слабых кислот (карбонатов, гидрокарбонатов, силикатов, боратов, сульфитов, гидросульфитов, сульфидов, гидросульфидов, анионов гуминовых кислот, фосфатов). Их сумма называется общей щелочностью. Ввиду незначительной концентрации трех последних ионов общая щелочность воды обычно определяется только анионами угольной кислоты (карбонатная щелочность). Анионы, гидролизуясь, образуют гидроксид-ионы:



Щелочность определяется количеством сильной кислоты, необходимой для нейтрализации 1 дм<sup>3</sup> воды. Щелочность большинства природных вод определяется только гидрокарбонатами кальция и магния, рН этих вод не превышает 8,3. Определение щелочности полезно при дозировании химических веществ, необходимых для обработки вод в целях водоснабжения, а также при реагентной очистке некоторых сточных вод. Определение щелочности при избыточных концентрациях щелочноземельных металлов важно для установления пригодности воды для ирригации. Вместе со значениями рН щелочность воды служит для расчета содержания карбонатов и баланса угольной кислоты в воде.

**Жесткость.** Согласно [27], жесткость воды – это свойство воды, обусловленное присутствием в ней ионов кальция и магния. По [15] суммарное содержание солей Са и Mg называют общей жесткостью. Общая жесткость подразделяется на карбонатную, обусловленную концентрацией гидрокарбонатов (и карбонатов при рН 8,3) кальция и магния, и некарбонатную – концентрацию в воде кальциевых и магниевых

солей сильных кислот. Поскольку при кипячении воды гидрокарбонаты переходят в карбонаты, которые выпадают в осадок, карбонатную жесткость называют временной (или устранимой). Остающаяся после кипячения жесткость называется постоянной. Жесткость воды обычно выражают в мг-экв/дм<sup>3</sup>.

В естественных условиях ионы кальция, магния и других щелочноземельных металлов, обуславливающих жесткость, поступают в воду в результате взаимодействия растворенного диоксида углерода с карбонатными минералами и других процессов растворения и химического выветривания горных пород. Источниками этих ионов являются также микробиологические процессы, протекающие в почвах на площади водосбора, в донных отложениях, а также сточные воды предприятий. Жесткость воды колеблется в широких пределах. Вода с жесткостью менее 4 мг-экв/дм<sup>3</sup> считается мягкой, от 4 до 8 мг-экв/дм<sup>3</sup> – средней жесткости, от 8 до 12 мг-экв/дм<sup>3</sup> – жесткой и выше 12 мг-экв/дм<sup>3</sup> – очень жесткой. Общая жесткость колеблется от единиц до десятков, иногда сотен мг-экв/дм<sup>3</sup>, причем карбонатная жесткость составляет до 70...80 % от общей жесткости. Жесткость морской воды и океанов значительно выше (несколько десятков и сотен мг-экв/дм<sup>3</sup>).

Обычно преобладает жесткость, обусловленная ионами кальция (до 70 %); однако в отдельных случаях магниевая жесткость может достигать 50...60 %. Жесткость поверхностных вод подвержена заметным сезонным колебаниям, достигая обычно наибольшего значения в конце зимы и наименьшего – в период половодья. Высокая жесткость ухудшает органолептические свойства воды, придавая ей горьковатый вкус и оказывая действие на органы пищеварения [15].

**Агрессивность воды.** Согласно [27], агрессивность воды – это способность воды и растворенных в ней веществ разрушать путем химического воздействия различные материалы.

**Химическое потребление кислорода.** Согласно [27], химическое потребление кислорода – это количество кислорода, потребляемое при химическом окислении содержащихся в воде органических и неорганических веществ под действием различных окислителей.

#### **Окисляемость перманганатная и бихроматная.**

Величина, характеризующая содержание в воде органических и минеральных веществ, окисляемых одним из сильных химических окислителей при определенных условиях, называется окисляемостью. Существует несколько видов окисляемости воды: перманганатная, бихроматная, йодатная, цериевая. Наиболее высокая степень окисления достигается методами бихроматной и йодатной обработки воды. Чаще всего на практике определяют бихроматную и перманганатную окисля-

емость (согласно [31], перманганатная окисляемость – химическое потребление кислорода при обработке пробы воды перманганатным ионом при определенных условиях; бихроматная окисляемость – химическое потребление кислорода при обработке пробы воды бихроматным ионом при определенных условиях). Окисляемость выражается в миллиграммах кислорода, пошедшего на окисление органических веществ, содержащихся в 1 дм<sup>3</sup> воды.

Состав органических веществ в природных водах формируется под влиянием многих факторов. К числу важнейших относятся внутриводоемные биохимические процессы продуцирования и трансформации, поступления из других водных объектов, с поверхностными и подземными стоками, с атмосферными осадками, с промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами. Образующиеся в водоеме и поступающие в него извне органические вещества весьма разнообразны по своей природе и химическим свойствам, в том числе по устойчивости к действию разных окислителей. Соотношение между содержащимися в воде легко- и трудноокисляемыми веществами в значительной мере влияет на окисляемость воды в условиях того или иного метода ее определения. В поверхностных водах органические вещества находятся в растворенном, взвешенном и коллоидном состояниях. Последние в рутинном анализе отдельно не учитываются, поэтому различают окисляемость фильтрованных (растворенное органическое вещество) и нефилтрованных (общее содержание органических веществ) проб.

Величины окисляемости природных вод изменяются в пределах от долей миллиграммов до десятков миллиграммов в 1 дм<sup>3</sup> воды в зависимости от общей биологической продуктивности водоемов, степени загрязненности органическими веществами и соединениями биогенных элементов, а также от влияния органических веществ естественного происхождения, поступающих из болот, торфяников и т. п. Поверхностные воды имеют более высокую окисляемость по сравнению с подземными (десятые и сотые доли миллиграмма на 1 дм<sup>3</sup>), исключение составляют воды нефтяных месторождений и грунтовые воды, питающиеся за счет болот. Горные реки и озера характеризуются окисляемостью 2...3 мгО/дм<sup>3</sup>, равнинные реки – 5...12 мгО/дм<sup>3</sup>, реки с болотным питанием – несколько десятков миллиграммов на 1 дм<sup>3</sup>.

Окисляемость незагрязненных поверхностных вод проявляет довольно отчетливую физико-географическую зональность: очень малая окисляемость (0...2 мгО/дм<sup>3</sup>) – в высокогорье; малая окисляемость (2...5 мгО/дм<sup>3</sup>) – в горных районах; средняя окисляемость (5...10 мгО/дм<sup>3</sup>) – в зоне широколиственных лесов, степи, пустынях и полупустынях, тундре; повышенная окисляемость (15...20 мгО/дм<sup>3</sup>) – в



таёжной зоне. Окисляемость подвержена закономерным сезонным колебаниям. Их характер определяется, с одной стороны, гидрологическим режимом и зависящим от него поступлением органических веществ с водосбора, с другой – гидробиологическим режимом.

В водоемах и водотоках, подверженных сильному воздействию хозяйственной деятельности человека, изменение окисляемости выступает как характеристика, отражающая режим поступления сточных вод. Для природных малозагрязненных вод рекомендовано определять перманганатную окисляемость; в более загрязненных водах определяют, как правило, бихроматную окисляемость (ХПК).

Для вычисления концентрации углерода, содержащегося в органических веществах, значение ХПК ( $\text{мгО}/\text{дм}^3$ ) умножается на 0,375 (коэффициент, равный отношению количества вещества эквивалента углерода к количеству вещества эквивалента кислорода).

**Биохимическое потребление кислорода (БПК).** Степень загрязнения воды органическими соединениями определяют как количество кислорода, необходимое для их окисления микроорганизмами в аэробных условиях (согласно [27], БПК – это количество растворенного кислорода, потребляемого за установленное время и в определенных условиях при биохимическом окислении содержащихся в воде органических веществ). Биохимическое окисление различных веществ происходит с различной скоростью. К легкоокисляющимся («биологически мягким») веществам относят формальдегид, низшие алифатические спирты, фенол, фурфурол и др. Среднее положение занимают крезолы, нафтолы, ксиленолы, резорцин, пирокатехин, анионоактивные ПАВ и др. Медленно разрушаются «биологически жесткие» вещества, такие как гидрохинон, сульфенол, неионогенные ПАВ и др. В лабораторных условиях наряду с БПК<sub>п</sub> (полного БПК) определяется БПК<sub>5</sub> – биохимическая потребность в кислороде за 5 суток. В поверхностных водах величины БПК<sub>5</sub> изменяются обычно в пределах 0,5...4,0 мг  $\text{O}_2/\text{дм}^3$  и подвержены сезонным и суточным колебаниям. Сезонные колебания зависят в основном от изменения температуры и от исходной концентрации растворенного кислорода. Влияние температуры сказывается через ее воздействие на скорость процесса потребления, которая увеличивается в 2–3 раза при повышении температуры на 10 °С. Влияние начальной концентрации кислорода на процесс биохимического потребления кислорода связано с тем, что значительная часть микроорганизмов имеет свой кислородный оптимум для развития в целом и для физиологической и биохимической активности. Суточные колебания величин БПК<sub>5</sub> также зависят от исходной концентрации растворенного кислорода, которая может в течение суток изменяться на 2,5 мг  $\text{O}_2/\text{дм}^3$  в зависимости от соот-

ношения интенсивности процессов его продуцирования и потребления. Весьма значительны изменения величин БПК<sub>5</sub> в зависимости от степени загрязненности водоемов.

Для водоемов, загрязненных преимущественно хозяйственно-бытовыми сточными водами, БПК<sub>5</sub> составляет обычно около 70 % БПК<sub>п</sub>. Определение БПК<sub>5</sub> в поверхностных водах используется с целью оценки содержания биохимически окисляемых органических веществ, условий обитания гидробионтов и в качестве интегрального показателя загрязненности воды. Необходимо использовать величины БПК<sub>5</sub> при контроле эффективности работы очистных сооружений. Полным биохимическим потреблением кислорода (БПК<sub>п</sub>) считается количество кислорода, требуемое для окисления органических примесей до начала процессов нитрификации. Количество кислорода, расходуемое для окисления аммонийного азота до нитритов и нитратов, при определении БПК не учитывается. Для бытовых сточных вод (без существенной примеси производственных) определяют БПК<sub>20</sub> (биохимическая потребность кислорода за 20 суток), считая, что эта величина близка к БПК<sub>п</sub>.

**Растворенный кислород.** Растворенный кислород находится в природной воде в виде молекул O<sub>2</sub>. На его содержание в воде влияют две группы противоположно направленных процессов: одни увеличивают концентрацию кислорода, другие уменьшают ее. К первой группе процессов, обогащающих воду кислородом, следует отнести: 1) процесс абсорбции кислорода из атмосферы; 2) выделение кислорода водной растительностью в процессе фотосинтеза; 3) поступление в водоемы с дождевыми и снеговыми водами, которые обычно пересыщены кислородом.

Абсорбция кислорода из атмосферы происходит на поверхности водного объекта. Скорость этого процесса повышается с понижением температуры, с повышением давления и понижением минерализации. Аэрация – обогащение глубинных слоев воды кислородом – происходит в результате перемешивания водных масс, в том числе ветрового, вследствие вертикальной температурной циркуляции и т. д.

Фотосинтетическое выделение кислорода происходит при ассимиляции диоксида углерода водной растительностью (прикрепленными, плавающими растениями и фитопланктоном). Процесс фотосинтеза протекает тем сильнее, чем выше температура воды, интенсивность солнечного освещения и больше биогенных (питательных) веществ (P, N и др.) в воде. Продуцирование кислорода происходит в поверхностном слое водоема, глубина которого зависит от прозрачности воды, которая для каждого водоема и сезона может быть различной: от нескольких сантиметров до нескольких десятков метров.

К группе процессов, уменьшающих содержание кислорода в воде, относятся реакции с его потреблением на окисление органических веществ: биологическое (дыхание организмов), биохимическое (дыхание бактерий, расход кислорода при разложении органических веществ) и химическое (окисление  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ). Скорость потребления кислорода увеличивается с повышением температуры, количества бактерий и других водных организмов и веществ, подвергающихся химическому и биохимическому окислению. Если вода при данных температуре и давлении окажется пересыщенной кислородом, то может происходить его выделение в атмосферу из поверхностных слоев.

В поверхностных водах содержание растворенного кислорода варьирует в широких пределах – от 0 до 14 мг/дм<sup>3</sup> – и подвержено сезонным и суточным колебаниям. Суточные колебания зависят от интенсивности процессов его продуцирования и потребления и могут достигать 2,5 мг/дм<sup>3</sup> растворенного кислорода. В зимний и летний периоды распределение кислорода носит характер стратификации. Дефицит кислорода чаще наблюдается в водных объектах с высокими концентрациями загрязняющих органических веществ и в эвтрофированных водоемах, содержащих большое количество биогенных и гумусовых веществ.

Концентрация кислорода определяет величину окислительно-восстановительного потенциала и в значительной мере направление и скорость процессов химического и биохимического окисления органических и неорганических соединений. Кислородный режим оказывает глубокое влияние на жизнь водоема. Минимальное содержание растворенного  $\text{O}_2$ , обеспечивающее нормальное развитие рыб, составляет около 5 мг/дм<sup>3</sup>. Понижение его до 2 мг/дм<sup>3</sup> вызывает массовую гибель (замор) рыбы. Неблагоприятно сказывается на состоянии водного населения и пересыщение воды кислородом в результате процессов фотосинтеза при недостаточно интенсивном перемешивании слоев воды. Определение кислорода в поверхностных водах включено в программы наблюдений с целью оценки условий обитания гидробионтов, в том числе рыб, а также как косвенная характеристика оценки качества поверхностных вод и регулирования процесса очистки стоков. Содержание растворенного кислорода существенно для аэробного дыхания и является индикатором биологической активности (т. е. фотосинтеза) в водоеме.

Относительное содержание кислорода в воде, выраженное в процентах его нормального содержания, называется степенью насыщения кислородом (согласно [27], насыщенность воды кислородом – это отношение фактически установленной концентрации кислорода в воде к его равновесной концентрации в данных условиях). Эта величина зави-

сит от температуры воды, атмосферного давления и солености. Вычисляется по формуле

$$O\% = \frac{[O_2] \cdot 101308}{N_O \cdot P} \cdot 100,$$

где  $O\%$  – степень насыщения воды кислородом, %;  $[O_2]$  – концентрация кислорода, мг/дм<sup>3</sup>;  $P$  – атмосферное давление в данной местности, Па;  $N_O$  – нормальная концентрация кислорода при данной температуре, минерализации (солености) и общем давлении 1 МПа.

## 2.2. Способы выражения концентраций

Согласно [1], в гидрохимической практике для выражения величины концентрации и формы результатов анализа проб воды применяются различные обозначения. Остановимся на этом обстоятельстве подробнее, так как от правильных обозначений этих величин зависит и правильность количественных характеристик состава воды. Количественное выражение результатов анализа состава воды зависит: 1) от размерности концентрации растворенного компонента; 2) формы соединения, в которой выражен результат определения данного компонента; 3) формы выражения концентрации растворенного компонента.

**Размерность.** Размерность абсолютной концентрации различных групп состава воды обычно выражена по-разному, что объясняется, с одной стороны, широким диапазоном изменения концентраций в природных водах (в пределах 10 порядков), с другой – исторически сложившимися традициями. В настоящее время в гидрохимической практике по этим группам концентраций приняты следующие выражения размерностей:

а) *главные ионы* при общей минерализации воды более 1 г/кг – в г/кг, меньше 1 г/кг – в мг/кг, или мг/л, так как при данных условиях один литр воды практически равен одному килограмму. При исследовании океанских и морских вод содержание главных ионов выражают в г/кг, обозначая его символом ‰ (промилле);

б) *растворенные газы* – количеством миллиграммов, растворенных в одном литре воды (мг/л), а в океанологической практике количеством миллилитров, содержащихся в одном литре воды (мл/л);

в) *биогенные элементы* – количество миллиграммов, содержащихся в одном литре воды (мг/л), а иногда и в микрограммах на один литр воды (мкг/л). В океанологической практике – в миллиграммах, содержащихся в одном кубическом метре воды (мг/м<sup>3</sup>), или в мкг/л;

г) *микроэлементы* – в мг/л или мкг/л.

При всех способах выражения приводятся лишь три значащие цифры.

**Формы соединения.** Форма соединения, в которой выражен результат анализа, отражается на количественном содержании данного элемента. Иногда это, к сожалению, не учитывается, и встречаются такие указания, как «фосфатов содержится 0,05 мг/л» или «нитратов 0,3 мг/л», без указания, в виде какого соединения выражен результат определения. Наиболее общеприняты в настоящее время формы соединения, выраженные в виде ионов или элемента, представляющего непосредственный интерес в данном соединении. Например, нитратный ион изображают в виде  $\text{NO}_3^-$  или  $\text{N-NO}_3^-$ , аммоний в виде  $\text{NH}_4^+$  или  $\text{N-NH}_4^+$ , фосфатные ионы в виде ионов  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  и  $\text{HPO}_4^-$  или фосфора P, хотя, разумеется, фосфор никогда не существует в воде в свободном состоянии.

Способ изображения соединения в виде элемента удобен для сравнения разных соединений одного и того же элемента, например нитратных, нитритных и аммонийных ионов, и органического азота. При необходимости выразить концентрацию в другой форме всегда следует делать пересчет, который не представляет никакого труда для любого человека, знакомого с элементарной химией. Например, если концентрация нитратных ионов, выраженная в  $\text{NO}_3^-$ , равна 0,5 мг/л, то в виде элемента она будет равна  $0,5 \cdot 14/62 = 0,113$ . В разные периоды изучения химии природных вод, соответственно приемам в аналитической химии, а также взглядам на природу растворов, результаты анализа выражали еще и в виде солей и окислов, что до сих пор иногда еще встречается в литературе.

**Формы концентрации.** Форма выражения концентрации растворенных в воде веществ имеет следующие разновидности:

1. *Весовая форма*, при которой концентрация выражается в г/кг, мг/м<sup>3</sup>, мл/л, мкг/л.

2. *Грамм-молекулярная форма*, при которой концентрация выражается в грамм-молекулах (или их долях) растворенного вещества в одном литре раствора (г-моль/л).

Для расчета грамм-молекулярной концентрации следует концентрацию в г/кг разделить на молекулярный вес вещества. Грамм-молекулярная, или молярная, концентрация обозначается буквой *M*. Например, 1,0 *M* (один молярный раствор), 0,1 *M* (децимолярный) и т. д. Если концентрация  $\text{CO}_2$  в дистиллированной воде, находящейся в равновесии с атмосферой, равна  $0,6 \cdot 10^{-3}$  г/л, то молярная ее концентрация будет  $0,6 \cdot 10^{-3}/44 = 1,36 \cdot 10^{-5}$  г-молей, или 0,0136 ммоль.

Разновидностью молярной концентрации является грамм-ионная форма концентрации. В этом случае количество г/кг данного иона делят на ионный вес. Например, при содержании  $\text{HCO}_3^-$  145 мг/л ионная концентрация составляет  $145/61 = 2,38$ . Молярная и ионная концентрации необходимы для расчетов химических равновесий в воде.

3. *Эквивалентная форма* схожа с грамм-ионной, но в ней за основу берется не грамм-ион, а грамм-эквивалент (г-экв). Для одновалентных ионов обе эти формы тождественны. Для перевода в эквивалентную форму надо концентрацию ионов в г/кг или мг/кг разделить на ионный вес и умножить на валентность, т. е. разделить на эквивалентный вес иона. Например, содержанию  $\text{SO}_4^{2-}$  – 2,705 г/кг – соответствует  $2,705 \cdot 2/96,066 = 0,05631$  г-экв/кг, или 56,31 мг-экв/кг, а концентрации  $\text{HCO}_3$  – 0,145 г/л –  $0,145/61,018 = 2,38 \cdot 10^{-3}$  г-экв/л, или 2,38 мг-экв/л.

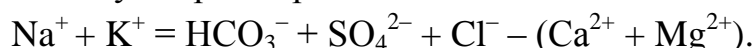
Эквивалентная форма выражения результатов анализа имеет особое значение в гидрохимической практике, и ее использование не исключает одновременного применения прочих форм. При применении эквивалентной формы все вещества выражены в тех химически равноценных единицах, пропорционально которым они вступают между собой в реакцию и связаны в солях, будучи в твердом состоянии. Эта форма облегчает выяснение происхождения состава воды, вероятного состава солей, которые будут выпадать при выпаривании воды, позволяет судить о правильности анализа и дает возможность расчета некоторых главных ионов без непосредственного аналитического их определения. На последнем обстоятельстве надо остановиться несколько подробнее.

При выражении ионов в эквивалентной форме число эквивалентов катионов в растворе должно равняться числу эквивалентов анионов. Если этого не наблюдается, то очевидно, что при анализе не определены какие-либо ионы или допущены погрешности в количественном определении. При анализе, включающем главные ионы, первое обстоятельство для большинства природных вод маловероятно. Гораздо чаще несоответствие в эквивалентах объясняется погрешностями, возникающими при анализе. Даже при хорошо проведенном анализе в отдельных определениях возможны погрешности, сумма которых в итоге может дать значительный процент расхождения в суммах анионов и катионов. При хорошо выполненном анализе это расхождение находится в пределах одного процента, однако вполне допустим анализ и при расхождении 2...3 %, особенно если минерализация воды невелика. При погрешности свыше 5 %, а при значительной минерализации свыше 3 % анализ следует считать недостаточно точным. Процент погрешности определяется по формуле

$$x = \frac{\sum a - \sum k}{\sum a + \sum k} 100,$$

где  $\Sigma a$  – сумма анионов,  $\Sigma k$  – сумма катионов (в мг-экв).

При анализе, если не требуется отдельное определение  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ , часто прибегают, взамен трудоемкого определения ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ , к расчету их по разности сумм эквивалентов. Очевидно, что сумма эквивалентов  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  будет равна разности эквивалентов:



Естественно, что данное определение наименее точное, так как на него падает вся сумма погрешностей, накапливающихся при отдельных определениях. Для перевода мг-эquiv в мг/л применяют эмпирический коэффициент, равный, по П.А. Кашинскому, для пресных вод 25, а для минерализованных 24. Последний коэффициент соответствует отношению  $\text{Na}^+/\text{K}^+ = 7,05$ . Но так как величины этого отношения колеблются в пресных маломинерализованных водах сравнительно в небольших пределах и концентрации  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  относительно других ионов невелики, то возникающей погрешностью можно пренебречь.

При изучении природных вод, особенно при сравнении вод разной минерализации, важно знать соотношение между ионами, для чего незаменимо использование относительного содержания ионов, выраженного в процентах эквивалентов от общей суммы ионов в данной воде. При этом сумма анионов и катионов принимается за 100 %. Следовательно, относительное эквивалентное содержание какого-либо из ионов определяется выражением

$$\% \text{ экв.} = \frac{a \cdot 100}{\sum a + \sum k},$$

где  $a$  – содержание иона в мг-эquiv/л.

4. *Атомная форма*, в которой концентрации растворенных веществ выражают в миллиграмм-атомах в одном литре воды (мг-атом/л), или мкг-атом/л. Эта концентрация вычисляется путем деления величины содержания данного элемента в мг/л на его атомный вес, если он выражен в виде элемента, или на сумму атомных весов элементов, составляющих данное соединение, если оно выражено в виде молекулы или иона. Атомная форма выражения концентрации раствора тождественна с грамм-молярной и грамм-ионной формой, а для одновалентных ионов – и с эквивалентной.

### 2.3. Краткая характеристика химического состава природных вод

Согласно [108], природные воды представляют собой сложные растворы, содержащие в своем составе все известные химические элементы в виде простых и сложных ионов, комплексных соединений, растворен-

ных или газообразных молекул, стабильных и радиоактивных изотопов. Еще В.И. Вернадский указывал, что в каждой капле, как в микрокосме, отражается состав космоса. В последние годы это положение подтверждается: из 87 стабильных химических элементов, известных в земной коре, около 80 обнаружены в природных водах (табл. 2.1). Нет сомнений и в том, что и все остальные элементы также будут установлены при повышении чувствительности аналитических методов.

Содержание ряда главных элементов в океанической воде относительно постоянно. Для элементов, встречающихся в весьма низких концентрациях (микроэлементов), наблюдаются значительные расхождения в кларковом содержании их в океанической (морской) воде. Формирование химического состава природных вод зоны гипергенеза начинается еще в атмосфере и продолжается в почвах, горных породах до тех пор, пока вода не окажется в области разгрузки и не покинет горные породы. Несмотря на довольно большое разнообразие химического состава атмосферных осадков, они, как правило, отличаются низкой минерализацией, не превышающей в районах гумидного климата 50 мг/дм<sup>3</sup>, а нередко и 20 мг/дм<sup>3</sup>.

Опубликованные в последние годы сведения по геохимии пресных подземных вод и рассолов, термальных, иловых, поровых и других видов вод не дают возможность сделать выводы о средних концентрациях химических элементов в подземных водах. Исключение составляют воды зоны активного водообмена. С.Л. Шварцев [122] рассчитал средние концентрации 50 химических элементов в подземных водах зоны гипергенеза в целом, используя результаты химического анализа более 25 тысяч проб воды.

Сложность состава природных вод определяется не только присутствием в них большого числа химических элементов, но и различным содержанием каждого из них, которое к тому же резко меняется в различных типах вод, а также разнообразием форм каждого элемента.

Таблица 2.1

*Средние содержания химических элементов в водных объектах  
(приводятся по [122])*

Компонент	Единицы измерения	Морская вода [132]	Реки [128, 129, 130]	Подземные воды зоны гипергенеза [122]
pH	–	8,2	–	6,9
CO <sub>2</sub> (св.)	мг/дм <sup>3</sup>	–	–	26,6
HCO <sub>3</sub> <sup>–</sup>		488	52,0	187
SO <sub>4</sub> <sup>2–</sup>		2712	8,25	76,7
Cl <sup>–</sup>		19400	5,75	59,7
Ca <sup>2+</sup>		411	13,4	39,2



Компонент	Единицы измерения	Морская вода [132]	Реки [128, 129, 130]	Подземные воды зоны гипергенеза [122]	
Mg <sup>2+</sup>		1290	3,35	18,2	
Na <sup>+</sup>		10800	5,15	67,6	
K <sup>+</sup>		392	1,30	5,15	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		–	0,44	2,40	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		–	0,02	0,59	
C <sub>орг</sub>		0,5	6,9*	8,29	
N <sub>орг</sub>		0,5	0,7*	0,98	
F <sup>-</sup>		1,3	0,10	0,48	
SiO <sub>2</sub>		6,2	10,4	17,9	
Li		170	3*	13,0	
Be	мкг/дм <sup>3</sup>	0,0006	–	0,19	
B		4450	10*	77,9	
Al		1,0	50	226	
P		88	10	58	
Sc		<0,004	0,004*	0,07	
Ti		1,0	10,0	17,4	
V		1,9	0,9*	1,34	
Cr		0,2	1,0*	3,03	
Mn		0,4	8,2	54,5	
Fe		3,4	40	481	
Co		0,39	0,2*	0,39	
Ni		6,6	0,3*	3,58	
Cu		0,9	7,0*	5,58	
Zn		5,0	20*	41,4	
As		2,6	2,0*	1,46	
Se		0,09	0,2*	0,72	
Br		67300	20*	85,2	
Rb		120	1,0*	1,86	
Sr		8100	60	183	
Zr		0,026	–	1,20	
Mo		10	1,0*	1,75	
Ag		0,28	0,3*	0,26	
Cd		0,11	–	0,24	
Sn		0,81	0,5*	0,39	
Sb		0,33	1,0*	0,68	
Cs		0,3	0,02*	0,26	
Ba		21	10*	18,3	
La		0,0034	0,2*	0,67	
Au		нг/дм <sup>3</sup>	11,0	2,0*	5,32
Hg			150	70*	41,1
Pb	мкг/дм <sup>3</sup>	0,03	3,0*	2,97	
Th		0,0004	0,1*	0,24	
U		3,3	0,04*	1,31	

Примечание: по [115, 120].

## 2.4. Классификации вод по гидрохимическим и физико-химическим показателям

В настоящее время разработано большое количество классификаций природных вод по гидрохимическим и физико-химическим показателям, в том числе классификации по химическому составу, минерализации, рН, окисляемости и т. д. По минерализации обычно выделяются пресные воды и соленые в разной степени воды (табл. 2.2).

Таблица 2.2

*Некоторые классификации природных вод по минерализации [108]*

Автор классификации	Категория	Минерализация, г/дм <sup>3</sup>
В.И. Вернадский	Пресные	<1
	Солоноватые	1...10
	Солёные	10...50
	Рассолы	>50
А.М. Овчинников	Ультрапресные	<0,2
	Пресные	0,2...0,5
	С повышенной минерализацией	0,5...1
	Солоноватые	1...3
	Солёные	3...10
	С повышенной соленостью	10...35
О.А. Алекин	Пресные:	(<1 г/кг)
	очень малой минерализации	<0,1
	малой минерализации	0,1...0,2
	средней минерализации	0,2...0,5
	повышенной минерализации	0,5...1
	Солоноватые	(1...25 г/кг)
	С морской солёностью	(25...50 г/кг)
Рассолы	(>50 г/кг)	
Классификация по [27]	Пресные	<1
	Солоноватые	1...9,999
	Солёные	10...50
	Рассолы	>50

Согласно [108], в настоящее время насчитывается несколько десятков классификаций природных вод по химическому составу, в основу которых положены различные принципы. Всеобъемлющей универсальной классификации еще не создано. К наиболее распространенным относятся классификации О.А. Алекина, М.Г. Валяшко и В.А. Сулина. Они достаточно просты и нашли наибольшее практическое применение. Описываемые ниже классификации учитывают только главные анионы ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) и катионы ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), присутствующие в природных водах.

**Классификация С.А. Щукарева.** По этой классификации ионы делятся на преобладающие и второстепенные. Преобладающими считаются те, количество которых составляет не менее 25 % (сумма анионов и катионов принимается раздельно за 100 %). Химический состав воды может иметь от 2 до 6 преобладающих ионов. На основании группировки анионов с катионами может быть получено 49 различных вариантов. Если, например, в воде преобладают ионы  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , то такая вода называется хлоридно-кальциевой, в случае же превалирования ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  – сульфатно-хлоридной натриево-магниевой. К недостаткам классификации относятся: 1) громоздкость; 2) отсутствие генетического подхода; 3) некоторый формализм, обусловленный математическим принципом классификации.

**Классификация В.А. Сулина.** В основу данной классификации положено несколько принципов: соотношение между ионами, преобладающие ионы и так называемые пальмеровские характеристики. При классификации подземных вод нефтяных и газовых месторождений широко используют типы, в то время как группы, подгруппы и классы практически не применяют. Отнесение подземных вод к тому или другому генетическому типу осуществляется по соотношению некоторых ионов, выраженных количеством вещества эквивалентов. Эти соотношения получили наименование генетических коэффициентов.

Химический состав подземных вод определяется условиями формирования в различных природных обстановках. Выделены три главные природные обстановки: морская, континентальная и глубинная. Недостатки классификации: 1) типы природных вод связаны с обстановкой формирования того или иного химического состава в большей степени, чем с историей образования растворимых в воде компонентов; 2) невозможно определить тип природных вод в случае, если генетические коэффициенты равны единице; 3) отсутствует тип кислых вод. Область применения: нефтегазовая гидрогеология и гидрогеохимия.

**Классификация О.А. Алекина.** Это наиболее часто применяемая в настоящее время классификация природных вод, сочетающая принцип деления химического состава по преобладающим ионам с делением по количественному соотношению между ними. Преобладающими считаются ионы с наибольшим относительным содержанием в процентах в пересчете на количество вещества эквивалентов. По преобладающему аниону природные воды делятся на три класса (рис. 2.1): 1) гидрокарбонатных и карбонатных вод (большая часть маломинерализованных вод рек, озер, водохранилищ и некоторые подземные воды); 2) сульфатных вод (промежуточные между гидрокарбонатными и хлоридными водами, генетически связаны с различными осадочными породами);

3) хлоридных вод (высокоминерализованные воды океанов, морей, соленых озер, подземные воды закрытых структур и др.).

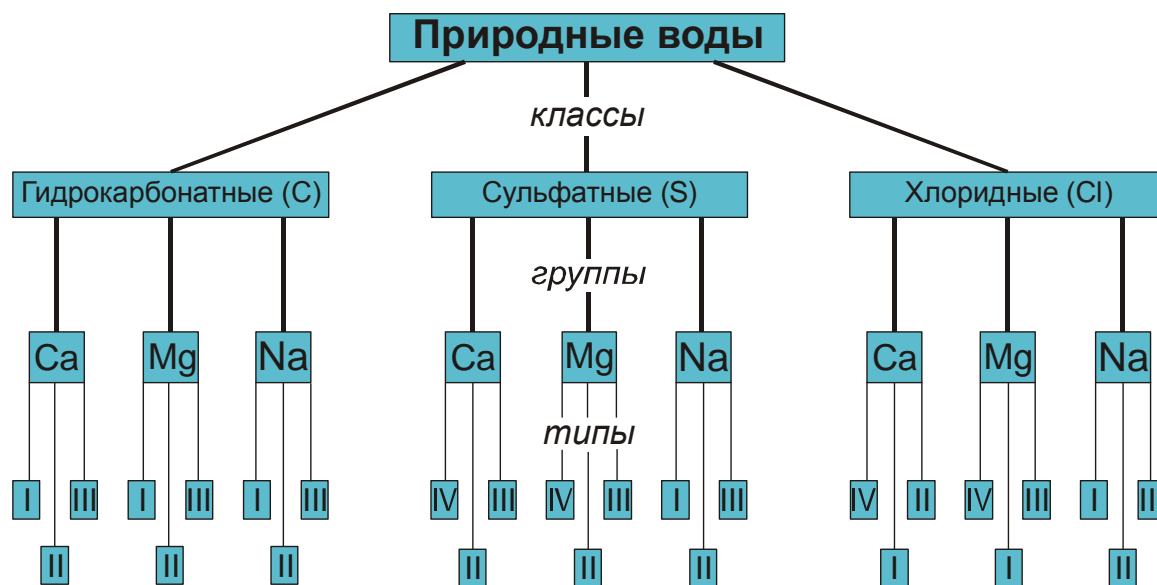


Рис. 2.1. Схема классификации природных вод по О.А. Алекину

Каждый класс по преобладающему катиону подразделяется на три группы: кальция, магния и натрия. Каждая группа в свою очередь подразделяется на четыре типа вод, определяемые соотношением между содержанием ионов в процентах в пересчете на количество вещества эквивалентов (табл. 2.3). Возможность существования природных вод других классов (нитратный, боратный) не исключена, но крайне маловероятна. Более реально преобладание в некоторых природных водах кремниевой кислоты, но она почти полностью недиссоциирована и не уравнивает катионы. Выделение в отдельный класс природных вод с преобладанием органического вещества невозможно, так как органическое вещество природных вод обладает весьма сложным составом.

Для краткого обозначения 27 видов природных вод применяются символы. Класс обозначается символом, выведенным из названия соответствующего аниона (С, S, Cl), а группа – своим химическим символом, который проставляется в виде степени к символу класса. Принадлежность к типу обозначается римской цифрой в индексе к символу класса. Следовательно, символы пишутся следующим образом:  $C_{II}^{Ca}$  (гидрокарбонатный класс, группа кальция, тип II). Кроме того, для количественной характеристики добавляются значения минерализации воды (внизу, с точностью до 0,1 ‰) и общей жесткости в пересчете на молярную концентрацию эквивалента (вверху, с точностью до целых миллимолей в 1 дм<sup>3</sup>): например,  $C_{II}^{Ca_{0,4}}$  означает, что вода гидрокарбо-

натного класса, группы кальция, типа II, с минерализацией 0,4 г/дм<sup>3</sup> и жесткостью 5 ммоль/дм<sup>3</sup>.

Таблица 2.3

*Типы природных вод по классификации О.А. Алёкина*

Тип вод	Соотношение ионов	Механизм и условия формирования
I	$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	Формируется при взаимодействии растворов с изверженными породами, содержащими большие количества $\text{Na}^+$ и $\text{K}^+$ . В отдельных случаях воды первого типа могут образовываться в результате обмена $\text{Ca}^{2+}$ на $\text{Na}^+$
II	$\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$	Формируется при взаимодействии с различными осадочными породами и продуктами выветривания коренных пород (большинство рек, озёр и подземных вод малой и умеренной минерализации)
III	$\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ или $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$	Формируется в результате испарения молекул воды и катионного обмена (обычно $\text{Na}^+$ раствора на $\text{Ca}^{2+}$ и $\text{Mg}^{2+}$ почв и пород). К этому типу относятся воды океанов, морей, лиманов, многих соляных озер и большинства сильноминерализованных подземных вод
IV	$\text{HCO}_3^- = 0$	Формируется при выветривании и разработке сульфидных месторождений и богатых сульфидами угольных залежей; при вулканической деятельности (кратерные озера, горячие источники); при активных сульфатредуцирующих процессах (воды грязевых вулканов и нефтяных месторождений); в северных и влажных областях (тундровые воды, воды торфяных болот)

Недостатки классификации: 1) нарушен принцип соподчинения, так как тип является высшей таксономической единицей, объединяющей классы, а не наоборот; 2) кислые воды (четвертый класс) не вписываются в рамки классификации, так как в подобных природных водах присутствуют в относительно больших концентрациях ионы тяжелых металлов; 3) отсутствует тип природных вод, соответствующий хлоридно-магниевому (по Сулину), что несколько сужает потенциальные возможности применения данной классификации для характеристики нефтяных вод, поверхностных и подземных рассолов. Применяется в гидрохимии поверхностных вод суши.

**Классификация М.Г. Валяшко.** В основу классификации положена растворимость карбонатов кальция, магния и сульфата кальция и метаморфизация природных вод. Отнесение природных вод к одному из

трех основных типов осуществляется с помощью так называемых коэффициентов метаморфизации.

Отличительным свойством выделенных типов природных вод является то, что переход состава воды из одного типа в другой не может быть осуществлен иначе, чем путем взаимодействия с веществом окружающей среды. Эти процессы получили наименование процессов метаморфизации природных вод. Типы связаны между собой взаимными переходами. Для кислого типа главным будет переход в один из первых трех типов вод (гораздо более устойчивых в поверхностной обстановке и в верхней части осадочной оболочки), и только в редких случаях и на очень ограниченных территориях происходит обратный переход одного из этих типов вод в кислые воды. Важным достоинством данной классификации является то, что в ее основе заложен генетический подход, который нередко дает возможность, с одной стороны, по современному химическому облику вод воссоздать их исходный состав, а с другой – предсказать вероятные изменения в химическом составе современных вод под действием процессов метаморфизации.

Несмотря на некоторые недостатки, классификации Валяшко и Алекина являются наиболее удачными из существующих. Классификации Валяшко и Сулина целесообразно использовать для характеристики главным образом подземных вод (в том числе и некоторых поверхностных вод – морских, океанических, соляных озер), классификацию Алекина – для поверхностных маломинерализованных вод суши (табл. 2.4).

Таблица 2.4

*Сопоставление типов природных вод по классификациям  
М.Г. Валяшко, В.А. Сулина и О.А. Алёкина [43, 121]*

М.Г. Валяшко	В.А. Сулин	О.А. Алёкин
Карбонатный	Гидрокарбонатно-натриевый	I
Сульфатный, подтипы:		
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Сульфатно-натриевый	II
MgCl <sub>2</sub>	Хлоридно-магниевый	IIIа
Хлоридный	Хлоридно-кальциевый	IIIб
Кислый		IV

Для наглядного изображения химического состава природных вод обычно используют формулы, чаще всего формулу Курлова, и графики. Формула Курлова составляется следующим образом: в числителе записываются анионы (в процентах от количества вещества эквивалента), в знаменателе – катионы (таким же образом). Содержания анионов и катионов располагаются в порядке убывания. Ионы, содержащиеся в воде в концентрациях менее 10 % (при сумме анионов и катионов по 100 %

каждых), не входят в формулу. Слева от дроби представляется минерализация в граммах на 1 дм<sup>3</sup> (г/дм<sup>3</sup>) и приводится содержание некоторых микроэлементов или преобладающих газов в мг/дм<sup>3</sup>. Справа от дроби записывается температура воды в градусах по Цельсию и дебит воды в кубических дециметрах в секунду. Пример:

$$M_{15} \frac{\text{Cl}^- 64 \text{HCO}_3^- 36}{\text{Na}^+ 72 \text{Ca}^{2+} 28} T_{22} D_{250}.$$

В гидрохимической терминологии имеет место несогласованность в названии типов природных вод. С целью унификации наименования природных вод рекомендуется придерживаться следующего правила: основное прилагательное писать полностью, а прилагательное, указывающее на второстепенное свойство предмета, сокращено. Например, если в химическом составе воды преобладают гидрокарбонатные и сульфатные анионы и катионы магния и натрия, причем гидрокарбонатного больше, чем сульфатного, а натрия больше, чем магния, то воду следует называть сульфатно-гидрокарбонатной магниевой-натриевой.

Графические построения применяют в основном в следующих целях: 1) для выяснения происхождений химического состава природных вод; используют два способа графического изображения, предложенных соответственно Е.В. Посоховым и М.Г. Валяшко с соавторами; 2) для изображения на гидрохимических картах и других графических материалах фактических данных по химическому составу природных вод; 3) для систематизации большого числа данных по химическому составу природных вод.

По величине рН, согласно [15], воды подразделяются: на сильно-кислые (<3); кислые (3...5); слабокислые (5,0...6,5); нейтральные (6,5...7,5); слабощелочные (7,5...8,5); щелочные (8,5...9,5); сильнощелочные (9,5). Несколько иное выделение групп приводится в [20]: нормальные (6,5...8,5); кисловатые (6,4...5,0); кислые (ниже 5,0); подщелочные (8,6...9,5); щелочные (выше 9,5). По жесткости воды подразделяются: на очень мягкие (не более 1,5 мг·эquiv/л); мягкие (1,51...3,00 мг·эquiv/л); умеренно жесткие (3,01...6,00 мг·эquiv/л); жесткие (6,01...9,00 мг·эquiv/л); очень жесткие (более 9,00 мг·эquiv/л) [20].

## 2.5. Качество природных вод

Согласно 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [65], качество окружающей среды – это состояние окружающей среды, которое характеризуется физическими, химическими, биологическими и иными показателями и (или) их совокупностью. В [87] предложен уточненный ва-

риант этого определения: *качество окружающей среды* (отдельных её компонентов) – это состояние окружающей среды (её компонентов), которое характеризуется физическими, химическими, биологическими и иными показателями и (или) их совокупностью *в сравнении с состоянием, обеспечивающим полноценное функционирование человечества и его адаптацию к изменениям биосферы*. Необходимость подобной поправки связана с тем, что, во-первых, термины «качество» и «состояние» не тождественны, во-вторых, качество есть «определённость предмета, в силу которой он является данным, а не иным предметом» [116, с. 150], то есть требуется некая шкала сравнения.

Во многих случаях эта шкала – бинарная, включающая две категории, в зависимости от того, соответствуют или не соответствуют фактические значения физических, химических, биологических и иных показателей критическим значениям, при которых обеспечивается цель охраны окружающей среды. Эти значения называются *нормативами качества* окружающей среды, а признак или комплекс признаков, по которым производится оценка качества, – *критерием качества*. Например, для воды водных объектов рыбохозяйственного назначения устанавливается предельно допустимая концентрация меди (растворимых в воде форм) в размере 0,001 мг/дм<sup>3</sup> (согласно [27, с. 3], ПДК – «концентрация веществ в воде, выше которой вода непригодна для одного или нескольких видов водопользования»). Если в воде обнаружена концентрация более 0,001 мг/дм<sup>3</sup>, то вода формально считается загрязненной (в соответствии с [27, с. 3], загрязнённость – это «содержание загрязняющих воду веществ, микроорганизмов и тепла, вызывающее нарушение требований к качеству воды», а согласно [65], «загрязняющее вещество – вещество или смесь веществ, количество и (или) концентрация которых превышают установленные для химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ и микроорганизмов нормативы и оказывают негативное воздействие на окружающую среду»).

В настоящее время ПДК установлены для воды поверхностных водных объектов (рыбохозяйственного и хозяйственно-питьевого назначения), подземных водных объектов (хозяйственно-питьевого назначения), атмосферного воздуха (срочных и среднесуточных концентраций) и почв. Для прочих компонентов окружающей среды (или их частей) ПДК отсутствуют. Шкалы сравнения могут включать и большее количество категорий. Так, применительно к воде поверхностных водных объектов рыбохозяйственного назначения в Росгидромете используется классификация, в соответствии с которой при фактической концентрации меди в диапазоне от 0,030 до 0,050 мг/дм<sup>3</sup> уровень загрязнения оценивается как «высокий, а при концентрации более 0,050 мг/дм<sup>3</sup> –



«экстремально высокий». Ещё один пример использования многомерных шкал приведен в табл. 2.5.

Таблица 2.5

*Классификация поверхностных вод согласно [20]*

Показатель	Чистые воды		Загрязненные воды		Грязные воды	
	Класс сапробности					
	ксеро-	олиго-	β-мезо-	α-мезо-	поли-	гипер-
Растворенный кислород, % насыщения	95–100	80–110	60–125	30–150	0–200	0
Прозрачность воды по диску Секки, м (не менее)	3,0	2,0	1,0	0,5	0,1	<0,1
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	0,0–0,5	0,6–1,0	1,1–2,0	2,1–3,0	3,1–10,0	>10
БПК <sub>20</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	0,0–1,0	1,1–2,0	2,1–3,0	3,1–4,0	4,1–15,0	>15
Перманганатная окисляемость, мгО/дм <sup>3</sup>	0,0–7,0	7,1–10,0	10,1–20,0	20,1–40,0	40,1–80,0	>80
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,0–0,05	0,06–0,10	0,11–0,50	0,51–1,00	1,01–3,00	>3
Нитраты, мг/дм <sup>3</sup>	0,05–5,0	5,1–10,0	10,1–40,0	40,1–80,00	80,1–150,0	>150
Нитриты, мг/дм <sup>3</sup>	0,0–0,001	0,002–0,04	0,05–0,08	0,09–1,5	1,6–3,0	>3
Фосфаты, мг/дм <sup>3</sup>	до 0,005	0,006–0,03	0,04–0,10	0,11–0,30	0,31–0,60	>0,6
H <sub>2</sub> S, мг/дм <sup>3</sup>	0,0	0,0	0,0	0,0	до 0,1	>0,1

В случаях, когда в компонент окружающей среды поступает не одно, а несколько веществ, комплексная оценка качества может проводиться путём выбора наихудшей оценки качества из ряда показателей и категорий. Но чаще всего (в том числе в базовых нормативных документах Роспотребнадзора) оценка качества выполняется для некоторой группы показателей объёмом  $N$  одного и того же класса опасности или с одним и тем же лимитирующим показателем вредности (ЛПВ) на основе принципа аддитивности воздействий с помощью неравенства:

$$\sum (C_i / \text{ПДК}_i) \leq 1, \quad (2.1)$$

где  $C_i$  и  $\text{ПДК}_i$  – фактическая и предельно допустимая концентрации  $i$ -го вещества. При этом отметим, что в группу с одним ЛПВ может попасть более 50 веществ. Следовательно, выполнение условия (2.1) возможно только при фактических концентрациях веществ в 50 и более раз меньше соответствующих ПДК. Однако из-за погрешностей используемых методов химического анализа и природных особенностей формирования химического состава вод (например, повышенные концентрации железа в таежной зоне, ионов  $\text{Na}^+$  – в аридных районах и т. д.) это практически невыполнимо (получается, что вода должна состоять только из молекул  $\text{H}_2\text{O}$ ?).

Кроме того, из приведённого выше примера с медью очевидно, что и с определением понятий «критерий качества», «норматив качества», «загрязняющее вещество», «загрязнённость» также не так всё просто и однозначно. Так, из процитированных определений следует, что либо влияние природных факторов приводит к загрязнению природных вод, так же как влияние антропогенных, либо все повышенные относительно ПДК содержания веществ связаны с антропогенным воздействием, независимо от того, есть такое воздействие или нет. Автору представляется, что ни то, ни другое не соответствует истине, поэтому, во-первых, целесообразно термин *загрязнение* связывать только с влиянием антропогенных факторов, приводящим к статистически значимому отклонению содержания вещества от «фоновых» значений. Соответственно, *загрязняющим веществом* является вещество или смесь веществ антропогенного или природно-антропогенного происхождения, количество и (или) концентрация которых превышают установленный фон.

Во-вторых, при определении нормы качества компонента окружающей среды необходимо опираться на принцип учёта природных и социально-экономических особенностей территорий при планировании и осуществлении хозяйственной и иной деятельности. В частности, в случае химического воздействия на воду, почву или воздух должен учитываться соответствующий геохимический «фон», хотя при этом возникает новый вопрос: что такое «фоновая» концентрация  $C_{\phi}$  и как её определить? Согласно [55, с. 5], «фоновая концентрация химического вещества – расчётное значение концентрации химического вещества в конкретном створе водного объекта, расположенном выше одного или нескольких контролируемых источников этого вещества, при неблагоприятных условиях, обусловленных как естественными, так и антропогенными факторами воздействия». На практике определение фоновой концентрации в основном сводится к расчёту среднего арифметического (с учётом погрешности его определения) за период, когда наблюдаются наихудшие условия для самоочищения:

$$C_{\phi} = C_{\text{ср}} + \frac{Z_{\alpha} \cdot \sigma}{\sqrt{M}}, \quad (2.2)$$

где  $Z_{\alpha}$  – критическое значение коэффициента Стьюдента при уровне значимости  $\alpha = 5\%$ ;  $M$  – длина ряда наблюдений;  $C_{\text{ср}}$  – среднее арифметическое значение концентрации вещества в исследуемом объекте в период года, наиболее неблагоприятный с точки зрения самоочищения;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение концентрации вещества [73].

## Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение понятий «химический состав» и «качество» природных вод.
2. Что такое минерализация воды? Какие основные закономерности пространственно-временного изменения минерализации природных вод вы знаете?
3. Расскажите, в чем суть классификации природных вод по минерализации. Приведите примеры водных объектов с различной минерализацией.
4. Какие формы миграции химических элементов в природных водах существуют? Как зависит мутность вод от содержания в них взвешенных веществ?
5. Что такое рН вод? В чем суть классификации вод по величине рН? Приведите примеры водных объектов с различной величиной рН вод.
6. Что такое окислительно-восстановительный потенциал? Соотнесите типы геохимических обстановок и соответствующие им значения Eh.
7. Что вы знаете о перманганатной и бихроматной окисляемостью, химическом и биохимическом потреблении кислорода? Назовите закономерности изменения окисляемости вод в различных природных зонах.
8. В чем заключается классификация природных вод по химическому составу согласно О.А. Алёкину?
9. Что вы знаете о формуле Курлова? В чем заключается методика её составления?
10. Дайте определение понятий «загрязняющее вещество», «ПДК», «ЛПВ». В чем заключается принцип аддитивности воздействия? Перечислите его преимущества и недостатки.
11. Дайте определение понятия «фоновая концентрация». Какие вы знаете способы определения фоновых концентраций веществ в природных водах?

### **3. ФАКТОРЫ И ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД**

Согласно [108], формирование химического состава природных вод – это процесс обмена химическими веществами природных вод с другими природными средами (атмосфера, породы, почвы, растительный и животный мир) в различных физико-географических условиях, в результате чего в природные воды переходят или извлекаются из них растворенные, газообразные, коллоидные и взвешенные вещества.

#### **3.1. Факторы формирования химического состава природных вод**

Путь, совершенный водой в процессе своего круговорота, определяет химический состав воды. Количество растворенных веществ в такой воде будет зависеть, с одной стороны, от состава тех веществ, с которыми она соприкасалась, с другой – от условий, в которых происходили эти взаимодействия. Как те, так и другие могут быть самыми различными, и поэтому так разнообразен качественный состав природной воды.

Факторы, определяющие формирование химического состава природных вод, могут быть разделены на две основные группы. К первой группе следует отнести прямые факторы, непосредственно воздействующие на воду (т. е. действие веществ, которые могут обогащать воду растворимыми соединениями, или, наоборот, выделять их из воды): горные породы, почвы, живые организмы, а также деятельность человека.

Ко второй группе относятся косвенные факторы, определяющие условия, в которых протекает взаимодействие веществ с водой: климат, рельеф, водный режим, растительность, гидрогеологические и гидродинамические условия и пр.

##### ***3.1.1. Породы***

Взаимодействие между водой и породами, этими важнейшими природными телами, является сложным процессом, который до сих пор еще малоизучен с количественной стороны. Этот процесс осложняется чрезвычайным разнообразием пород и условий среды. Выделяют несколько групп пород по особенностям их воздействия на воду: соли, более или менее растворимые в воде; изверженные и метаморфические породы; глинистые породы [108].

*Соли.* В земной коре растворимые соли представлены главным образом хлористыми, сернокислыми и углекислыми соединениями натрия, калия, кальция и магния. Это преимущественно соли морского происхождения, содержащиеся в осадочных породах: прежде всего каменная соль (NaCl), гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), известняки ( $\text{CaCO}_3$ ), различные карбонатные соединения кальция и магния переменного состава – мергели и доломиты. Кроме того, на поверхности земли и вблизи нее имеется немало солей континентального происхождения: гипс, галит, тенардит, мирабилит, кизерит, эпсомит и др.

По растворимости сульфатные и особенно хлористые соли натрия, калия, кальция и магния могут быть отнесены к легкорастворимым в отличие от карбонатных солей кальция и магния. Из хлористых солей наименее растворима каменная соль (26,5 %), а из сернокислых – гипс (0,21 %), но растворимость последнего в присутствии других солей может значительно (более чем в 3 раза) увеличиться.

Легкая растворимость хлористых и сернокислых солей обуславливает их вымывание из почв и самых верхних слоев пород в зонах достаточного увлажнения. В менее увлажненных областях в засушливые периоды года в результате капиллярного поднятия грунтовых растворов вблизи поверхности земли чаще наблюдаются минерализованные растворы этих солей. В областях с засушливым климатом в понижениях рельефа на поверхности земли можно часто наблюдать даже сухие соли. Громадные количества сульфатов и хлоридов натрия, калия, кальция, магния содержатся в рапе соляных озер, в виде пластов солей на дне озера и на берегах.

Помимо растворимости соли важнейшей ее характеристикой, имеющей в конкретных условиях решающее значение для перехода соли в природные воды, является кинетика растворения. В общем случае количество соли  $x$ , перешедшее в раствор за время  $t$ , зависит от площади поверхности соли  $s$  (и, следовательно, степени дисперсности), концентрации соли в насыщенном растворе  $c$ , концентрации соли  $c_t$  в момент  $t$  и коэффициента  $K$  и определяется дифференциальным уравнением:

$$\frac{dx}{dt} = K \cdot S \cdot (c - c_t).$$

Однако расчет по этому уравнению осложняется многими обстоятельствами, из которых наиболее существенны следующие: 1) уменьшение действительной поверхности соли из-за контакта с труднорастворимым скелетом породы; 2) условия фильтрации через породы; 3) существование пограничного слоя раствора у поверхности соли с концентрациями, отличными от состояния насыщения, требующего учета диффу-

зионного процесса. Поэтому был предложен ряд формул и методов расчета, предусматривающих расчет с учетом многообразия естественных условий путем введения постоянных, характеризующих эти условия. Например, расчетные уравнения Н.Н. Веригина [108] предусматривают как случаи с дисперсным рассеянием соли в массе нерастворимого вещества, так и случаи рассеяния солей на поверхности пор или трещин породы. Экспериментальная проверка этих уравнений показала хорошую сходимость результатов.

Растворимость солей имеет очень большое значение для миграции элементов. Распространенность карбонатов в земной коре во много раз больше, чем хлористых и сернокислых солей. Большая часть последних к тому же залегает далеко от поверхности или находится в высокоминерализованных пластовых водах. Содержания  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  составляют соответственно  $\frac{1}{4}$  и  $\frac{1}{2}$  от всех анионов речной воды. Еще более показательна будет подвижность  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ , если сравнить их концентрации в речных водах с кларком этих элементов в литосфере.

Благодаря лучшей растворимости, несмотря на меньшее распространение в коре выветривания, растворимые соли (хлориды, сульфаты и карбонаты) являются главным источником формирования минерализации поверхностных вод. При этом основное значение для химического состава воды имеют соли, находящиеся не столько в виде залежей, сколько в рассеянном состоянии в различных осадочных, глинистых и песчаных породах и почвах.

*Изверженные и метаморфические породы.* Эти породы хотя и составляют основную часть земной коры, но в коре выветривания занимают сравнительно небольшой объем. Помимо массивно-кристаллических образований, они широко распространены в виде обломочного материала различной степени дисперсности в осадочных породах и почвах. Их повсеместная распространенность, несмотря на их малую растворимость, заставляет считаться с ними как с одним из источников формирования минерализации природных вод, но еще очень мало изученным.

Большинство изверженных пород – это алюмосиликаты и продукты их разрушения. Основными пороодообразующими минералами являются полевые шпаты и слюды.

По степени разложения алюмосиликатов процесс выветривания делится на два этапа: каолиновое выветривание, при котором в алюмосиликатах в основном сохраняются связи алюминия с кремнием и образуются многочисленные разновидности глинистых минералов, и аллитное выветривание, при котором образуются оксиды и гидроксиды (бокситы, опал, кварц и др.).

На скорость протекания процессов выщелачивания алюмосиликатов в сильнейшей степени влияют физико-географические условия и в первую очередь климатические. В процессе выщелачивания очень большую роль играют значения рН. От них зависит характер образующихся продуктов и, вероятно, скорость данного процесса, которая увеличивается при низких и высоких значениях рН. Процесс выщелачивания ускоряется в присутствии кислорода, серной, угольной и органических кислот.

*Глинистые породы.* Глинистые, породы, составляющие большую часть осадочных пород, являются очень сложными как по минералогическому, так и по химическому составу системами, по степени своей дисперсности близкими к коллоидам.

По происхождению глины связаны с химическим выветриванием алюмосиликатов, поэтому основной массой глин являются глинистые минералы, в частности группы каолинита, монтмориллонита, галлуазита, гидрослюды и др. Кроме того, в них встречаются разные сингенетические минералы и в менее тонких фракциях – различные обломочные зерна, входившие в алюмосиликатную породу (кварц, полевые шпаты, слюды).

Наиболее интересными с точки зрения воздействия на состав природной воды являются соли, содержащиеся в связанной воде и в кристаллах глин, и ионы поглощающего комплекса. Глины характеризуются чрезвычайно плохой проницаемостью, поэтому вымывание из них солей всецело связано с условиями контакта породы с водой. Вымывание солей при непосредственной фильтрации через глину практически ничтожно, но оно возрастает при переходе к суглинкам и супесям. Особенно благоприятствует вымыванию солей трещиноватость пород и наличие более водопроницаемых прослоек, растительных остатков, обломочных и других материалов, увеличивающих поверхность контакта воды с глиной и способствующих дренажу.

Другой путь удаления солей из глин – это диффузионное перемещение солей в поровом растворе при наличии разности концентраций в последнем по сравнению с омывающей снаружи природной водой.

Помимо солей, содержащихся в глинах в виде кристаллов и растворенных в связанной воде, большое значение для ионного состава природных вод и, в частности, поверхностных имеет способность глин обменивать поглощенные ими ионы на ионы водорода или другие ионы, находящиеся в воде. Это явление – следствие сильно развитой поверхности высокодисперсных глинистых минералов. И поскольку мицеллы алюмосиликатов имеют отрицательный заряд, глины в большинстве

случаев проявляют себя как природные катиониты. Обменную способность глин, так же как и почв, характеризуют емкостью обмена, что соответствует количеству вещества эквивалента  $\text{Ba}_2 n$  ( $1/2 \text{Ba}^{2+}$ ), моль которого может поглотить 1 кг или 1 г поглотителя из раствора с концентрацией  $c$  ( $1/2 \text{BaCl}_2$ ) = 0,1 моль/дм<sup>3</sup> при рН = 6,5. Часто емкость обмена выражают в миллимолях на 100 г породы.

Емкость обмена у разных глинистых минералов колеблется в широких пределах и связана не только с их дисперсностью, но и с рядом особенностей этих минералов, в частности с их кристаллохимической структурой. Наименьшая емкость поглощения в пересчете на количество вещества эквивалентов наблюдается у каолинита (5...15 ммоль/100 г породы), несколько выше она у гидрослюды (10...30 ммоль/100 г) и наибольшая у монтмориллонита (до 100 ммоль/100 г).

Обменный комплекс составляет у некоторых глин существенную часть их массы. Для монтмориллонита, например, он достигает 2 % массы породы.

Склонность к поглощению, при прочих равных условиях, у катионов природной воды возрастает в порядке  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ . В результате этого при контакте воды с глинистой породой соотношение между ионами как в воде, так и в обменном комплексе глины будет стремиться прийти к некоторому равновесию. При контакте речных вод с обычным для них ионным составом с глиной имеется общая тенденция к переходу  $\text{Ca}^{2+}$  в состав обменного комплекса породы, почвы взамен  $\text{Na}^+$ , которые будут стремиться перейти в раствор.

Преобладанию  $\text{Ca}^{2+}$  будет способствовать постоянное пополнение речных вод этими ионами в количестве, обычно превышающем содержание  $\text{Na}^+$ , из широко распространенных карбонатных пород. Все это объясняет низкую концентрацию, а часто и полное отсутствие  $\text{Na}^+$  в породах и почвах вблизи поверхности при достаточном количестве атмосферных осадков.

### **3.1.2. Почвы**

Основное отличие почвы от породы заключается в том, что в ее состав помимо минеральных компонентов, являющихся главной массой почв (90...95 %), входят органические и органоминеральные составляющие. Почвы состоят из фракций самой различной дисперсности. В минеральную часть почвы в зависимости от породы, на которой сформирована почва, входит мелкий обломочный материал, оставшийся от разрушения горной породы, и высокодисперсные глинистые материалы, по размерам частиц приближающиеся к коллоидам. Органическая часть



почвы состоит из продуктов распада растений и живых организмов различной степени измельченности и трансформации, подвергнувшихся сложной биохимической переработке [108].

Весь этот разнородный по составу и происхождению материал пропитан почвенным раствором, находящимся в постоянном взаимодействии с твердой частью почвы и газами, образующимися при разложении органических веществ и проникающими из атмосферы.

Различие компонентов почвы, степени их дисперсности и характера продуктов разложения веществ, зависящее от климатических, литологических и некоторых других условий, создает весьма большое разнообразие типов почв. Все это определяет многообразное влияние почв на формирование химического состава природных вод. Наиболее существенной стороной взаимодействия почв с водой является превышение минерализации фильтрующихся через почву маломинерализованных атмосферных осадков. Это происходит как за счет вымывания почвенного раствора, так и вследствие растворения кристаллических солей, содержащихся в почве.

Почвенный раствор служит средой, через которую происходит обмен отдельными составляющими почвы. Его ионный состав очень динамичен и зависит от материнской породы, на которой формировалась почва, гидрометеорологических условий, химических и биологических процессов, состава грунтовых вод и многих других факторов. Поэтому почвенный раствор не только различен для каждой почвы, но и по-разному изменяется как по глубине одного и того же профиля, так и в течение года.

Почвы зоны избыточного увлажнения (подзолистые, дерновые, бурые, серые лесные), где их толща промывается до грунтовых вод, слабо обогащают фильтрующиеся через них атмосферные осадки, особенно хлористыми и сернокислыми солями. Тундрово-глеевые и болотные почвы, питание которых происходит практически только за счет атмосферных осадков, также мало обогащают ионный состав фильтрующейся воды, но сильно обогащают ее органическими веществами, концентрация которых часто превышает концентрацию растворенных минеральных веществ.

В областях с сухим климатом (полуаридная и аридная зоны) почвы промачиваются в кратковременный (весенний) период выпадения атмосферных осадков лишь на небольшую глубину. Основное направление движения почвенной влаги в большую часть времени года – снизу вверх к поверхности почвы. Поднимающаяся в силу капиллярности влага испаряется, а сконцентрированный раствор или даже выпавшие в осадок соли засоляют почву. Редкие же летние дожди, не образуя стока,

только частично увлажняют поверхность иссушенной почвы. Такие почвы (каштановые, бурые, пустынно-степные и др.) содержат сухие кристаллические соли, их почвенный раствор имеет значительную концентрацию, а вода, образующаяся в период кратковременного стока, обладает повышенной минерализацией.

Особенно засоляются почвы засушливых областей при близости грунтовых вод к поверхности земли. Их залегание на глубине 2...3 м от поверхности земли вполне достаточно для капиллярного поднятия влаги, а некоторые высокодисперсные почвы создают капиллярное поднятие грунтовых вод и при залегании на 5...6 м. Таким путем образуются солончаки на разных почвах засушливых областей. Наиболее интенсивное образование солончаков происходит при соответствующей морфологии рельефа: в низменных частях равнин, дельтах рек, низменном морском побережье, где поверхность почвы нередко покрыта белыми выцветами сухих солей.

Интенсивность вымывания солей из почвы, помимо того, зависит от состояния поверхности почвы. При промерзшей или переувлажненной почве быстро стекающие атмосферные осадки соприкасаются лишь с самыми поверхностными ее слоями, а это создает ограниченность вымывания солей и малую минерализацию воды поверхностного стока. Поэтому характер выпадающих осадков (дождь или снег) и их интенсивность и продолжительность имеют также большое значение.

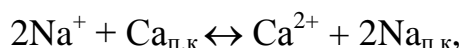
При фильтрации через почву ионный состав вод меняется. Этот важный процесс в почве происходит в результате обменных реакций между ионами воды и ионами поглощающего комплекса, имеющегося в почвах так же, как и в глинах.

Этот комплекс представляет собой коллоиды, содержащие преимущественно  $\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3$  и другие отрицательно заряженные соединения. Он характеризуется обменной емкостью поглощенных катионов и в значительно меньшей мере анионов, исключая отдельные почвы (латеритовые, красноземные). Ионы обменного комплекса почв постоянно взаимодействуют с почвенным раствором, регулируя его состав.

Обменный комплекс почв обычно наименьший у северных, хорошо промытых почв и южных, засоленных почв (5...20 ммоль/100 г почвы) и наибольший у черноземов (до 40...50 ммоль/100 г почвы в пересчете на количество вещества эквивалентов). Поглотительная способность почв связана с наличием не только высокодисперсной минеральной фракции, но и коллоидной фракции органических веществ – почвенного гумуса. Содержание последнего значительно меньше содержания минеральной фракции, но емкость обмена на единицу массы коллоидного гумуса в несколько раз превосходит емкость минеральной части. Именно с гумусом

связана высокая обменная емкость черноземных почв. Например, емкость поглощения гуминовой кислоты в пересчете на количество вещества эквивалентов отдельно от почвы составляет около 350 ммоль/100 г, а емкость монтмориллонитовой глины (обладающей среди глинистых минералов наиболее высокой емкостью) 80...100 ммоль/100 г. Но так как органических веществ в большинстве почв меньше 5...10 %, емкость поглощения почв в основном связана с минеральной частью.

Катионы поглощающего комплекса могут быть замещены эквивалентным количеством других катионов, которые более энергично удерживаются почвой. Энергия поглощения катионов почвами такая же, как и для глин. Так, если концентрация натрия достаточно велика, то часть ионов кальция из поглощающего комплекса будет вытеснена ионами натрия. Следовательно, между поглощающим комплексом почвы и взаимодействующим с ним составом воды будет устанавливаться подвижное равновесие, при котором количество поглощенных катионов того или иного вида будет зависеть как от абсорбционной способности, так и от их концентрации. Это равновесие, так же как и для глин, может быть отобрано для обмена  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ca}^{2+}$  в виде следующей схемы:



где п.к – поглощающий комплекс.

Равновесие сдвигается вправо при увеличении концентрации  $\text{Na}^+$  и влево при ее уменьшении или увеличении содержания  $\text{Ca}^{2+}$ . Это обстоятельство приводит к тому, что при фильтрации большого количества воды сквозь почву можно постепенно вымыть из ее поглощающего комплекса почти все катионы, заменив их ионами водорода. Атмосферные воды легче всего вымывают ионы, обладающие наименьшей энергией поглощения. Поэтому почвы средних широт, например черноземы, имеют в составе своего поглощающего комплекса преимущественно  $\text{Ca}^{2+}$ , а затем  $\text{Mg}^{2+}$ . В северных широтах, отличающихся высокой влажностью, из почвы вымыта большая часть катионов и в поглощающий комплекс входят ионы водорода. В результате этого процесса образуются характерные кислые почвы севера.

Ионное равновесие между раствором и твердой фазой почв характеризуется константами равновесия. Но для почв, которые представляют собой системы еще более сложные, чем глины, условия обмена более многообразны и сложны. В почвах, помимо различия в минералогическом составе, имеют значение различия в органических коллоидных веществах. Естественно, что константы равновесия, найденные для различных почв, неодинаковы. Все же, несмотря на это, применение констант

позволяет следить за направлением процесса обмена и дает с некоторыми ограничениями возможность судить и о количественных соотношениях.

Почвенный раствор и фильтрующиеся через почву атмосферные осадки способны усиливать растворение пород и минералов. Это одно из важнейших свойств почвы, влияющее на формирование состава природных вод, является результатом увеличения концентрации диоксида углерода в почвенном растворе, выделяющегося при дыхании живых организмов и корневой системы в почвах и биохимическом распаде органических остатков.

Вследствие этого концентрация  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе возрастает от 0,033 %, свойственных атмосферному воздуху, до 1 % и более (в тяжелых глинистых почвах концентрация  $\text{CO}_2$  в почвенном воздухе достигает иногда 5...10 %, придавая тем самым раствору сильное агрессивное действие по отношению к породам).

Другим фактором, усиливающим агрессивное действие фильтрующейся через почву воды, является органическое вещество – почвенный гумус, образующийся в почвах при трансформации растительных остатков. В составе гумуса в качестве активных реагентов прежде всего следует назвать гуминовые и фульвокислоты и более простые соединения, например органические кислоты (лимонная, щавелевая, уксусная, яблочная и др.), амины и т. п. Среди них особенно следует отметить фульвокислоты, распространенные в северных почвах. Почвенный раствор, обогащаясь гуминовыми кислотами и  $\text{CO}_2$ , во много раз ускоряет химическое выветривание алюмосиликатов, содержащихся в почвах. Аналогично вода, фильтрующаяся через почву, ускоряет химическое выветривание алюмосиликатов и карбонатных пород, подстилающих почву.

Значительное влияние на перевод в растворимое состояние химических компонентов из минералов почв и подстилающих пород оказывает живое вещество почв, растения, выделяющие корневой системой кислоты (лимонную, уксусную и др.), и бактерии в процессе жизнедеятельности.

### ***3.1.3. Живые организмы***

Роль живых организмов в формировании химического состава природных вод обширна и многообразна. Не говоря уже о хозяйственной деятельности человека, достаточно упомянуть имеющую громадное не только биологическое, но и геохимическое значение фотосинтетическую деятельность растений, в результате которой создается первичная продукция органического вещества и регулируется содержание  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в атмосфере. Общеизвестна также роль многочисленных видов бактерий,

незаметно, но непрестанно проделывающих громадную работу по вовлечению в круговорот самых различных минеральных веществ. Многие бактерии, наряду с фотосинтезирующими растениями, создают первичное органическое вещество. Избирательная деятельность организмов сказывается на концентрации не только многих микроэлементов, но и некоторых макроэлементов, таких как кальций, калий, кремний.

Природные воды, соприкасаясь в почвенном слое со сложным комплексом органических веществ, являющихся главным образом продуктами распада растений, вымывают из него некоторую часть гумусовых веществ и других промежуточных продуктов распада и гумификации. Особенно легко это происходит в тех почвах, поглощающий комплекс которых насыщен водородом (кислые почвы), поэтому воды торфяников и болот всегда окрашены в желтый и даже коричневый цвет. В некоторых поверхностных водах, особенно в реках с болотным питанием, вещества гумусового происхождения являются основной частью химического состава воды. После поступления в хорошо аэрируемые реки, а затем озера и моря органические вещества воды подвергаются изменению, и начатый в почвах процесс окисления завершается для большей их части переходом в простые минеральные соединения. Другая, более устойчивая часть остается и накапливается в водных объектах.

#### ***3.1.4. Деятельность человека***

В результате развития промышленности и сельского хозяйства, роста народонаселения человек извлекает все большее количество химических элементов из земных недр, концентрирует их, а затем рассеивает в процессе производства и потребления продуктов питания и промышленных товаров. Возросшие технические возможности позволяют человеку преобразовывать природу; при этом как сознательно, так и стихийно он вмешивается в природные процессы круговорота веществ, часто нарушая существующее в природе равновесие. Масштабы влияния антропогенного фактора сопоставимы с природными геохимическими процессами.

Деятельность человека приводит к заметным, а в ряде случаев к значительным, изменениям химического состава природных вод. Многолетние наблюдения показывают, что вследствие антропогенной деятельности увеличивается количественно и изменяется качественно химический состав атмосферных осадков, грунтовых вод, воды рек, озер, водохранилищ. Общеизвестно, что минерализация речных вод в густонаселенных районах неуклонно возрастает, особенно при зарегулировании стока (увеличении площади испарения) и развитии орошения в

сельском хозяйстве (усиленный дренаж почв, поступление части удобрений и ядохимикатов с полей в реки через коллекторы).

Распашка земель изменяет соотношение между поверхностным и грунтовым питанием рек, значительно усиливает процессы химической и механической эрозии. К этому же приводит и вырубка лесов, нарушение почвенного покрова при строительстве, разработке полезных ископаемых и т. д.

Мероприятия по снижению загрязнения природных вод непосредственно различными сточными водами могут привести к желательным результатам (восстановление первоначального качества воды) сравнительно быстро (в течение нескольких лет). Изменения в геохимических процессах, происходящие в результате воздействия человека на водосборную площадь, заметны не сразу. Эффект этого воздействия накапливается значительно медленнее. А после ликвидации источников загрязнения положительный эффект мы увидим спустя длительный период времени. Для этого потребуются десятилетия, а может быть и сотни лет. Поэтому наряду с мерами по уменьшению загрязненности непосредственно водных объектов необходимо разрабатывать научно обоснованные мероприятия на водосборах, направленные на охрану и улучшение окружающей среды, в том числе и природных вод.

### ***3.1.5. Климат***

Климат имеет огромное значение для химического состава природных вод. Он, прежде всего, определяет баланс тепла и влаги, от которого зависит увлажненность местности и объем водного стока, а следовательно, и разбавление или концентрирование природных растворов и возможность растворения веществ или выпадения их в осадок.

С климатическими условиями связано направление движения почвенных и грунтовых растворов вблизи поверхности земли. От климатических характеристик также зависят условия взаимодействия воды с породами, процесс выветривания горных пород, тип почвообразования и растительности и характер разложения последней, что в свою очередь влияет на формирование минерализации воды. Огромно влияние такой важнейшей климатической характеристики, как температура воздуха, пород, почвы и природных вод данной местности, так как известно, что скорость химических реакций изменяется в 2–3 раза при изменении температуры на 10 °С. Климатические условия определяют не только количество, но и характер атмосферных осадков (дождь или снег), их распределение в течение года, условия миграции различных элементов, промерзаемость почвы, существование многолетней мерзлоты, с чем

тесно связан гидрохимический режим природных вод на поверхности земли и вблизи нее. На минерализацию и состав малорастворимых веществ влияет и замерзание воды. В аридном климате на минерализацию поверхностных и грунтовых вод решающее влияние оказывает так называемое испарительное концентрирование. Влияние климата на химический состав воды настолько существенно, что часто является решающим фактором, определяющим не только минерализацию воды, но и ее химический состав. Климат создает общий фон, на котором происходит большинство процессов, влияющих на формирование химического состава природных вод.

### ***3.1.6. Рельеф***

Рельеф местности косвенно влияет на минерализацию воды, способствуя вымыванию солей из толщи пород. Глубина эрозионного вреза реки облегчает поступление в реку более минерализованных грунтовых вод нижних горизонтов. Этому же способствуют и другие виды депрессий (речные долины, балки, овраги), улучшающие дренирование водосбора. Это особенно существенно для горных условий. Горы, с одной стороны, непосредственно влияют на минерализацию воды благодаря увеличению поверхности контакта воды с породами, а с другой – обуславливают вертикальную климатическую зональность, направление воздушных масс и различие освещенности склонов. Рельеф, влияя на скорость отекания воды, определяет время ее контакта с почвами и породами, скорость фильтрации через них и возможность заболачивания.

В областях с аридным климатом рельеф выступает в качестве одного из ведущих факторов формирования химического состава природных вод. Если бессточная котловина собирает поверхностный сток и одновременно дренирует подземные воды (является местом их разгрузки), то вследствие высокой испаряемости в котловине образуются соляные и самосадочные озера. Если дно бессточной котловины лежит выше уровня грунтовых вод и в то же время она аккумулирует поверхностные воды, то при достаточной проницаемости пород, слагающих ее дно, котловина может стать «областью питания» грунтовых вод и под ее дном сформируется линза пресных и солоноватых вод.

Положительные формы рельефа являются местами рассолонения, а отрицательные – засоления. При расчлененном рельефе на водораздельных участках поверхностные воды пресные, а в пониженных – соленые. Грунтовые же воды в этом случае на водоразделах и на склонах не засоляются в связи с хорошим стоком.

### **3.1.7. Водный режим**

Водный режим имеет существенное значение в формировании химического состава природных вод и в то же время зависит от ряда физико-географических условий. Химический состав воды рек зависит от времени наступления половодья, его продолжительности, характера их питания. На изменение химического состава воды рек влияет также и их протяженность, которая определяет различие гидрологического режима отдельных частей реки, наличие притоков, протекание реки через водоем и др. Наличие стока из озера определяет минерализацию воды, водообмен между отдельными его частями. Минерализация подземных вод очень сильно зависит от степени влияния поверхностных вод на данный водоносный горизонт, наличия трещин, скорости движения воды в породах.

Огромное влияние на химический состав воды и его изменение с течением времени оказывают источники питания водного объекта и их соотношение. В период максимума снегового питания вода в реках, озерах и водохранилищах имеет более низкую минерализацию, чем в период, когда большая часть питания осуществляется за счет грунтовых и подземных вод. Это обстоятельство используют при регулировании наполнения водохранилищ и сброса из них воды. Как правило, водохранилища наполняют в период весеннего половодья, когда приточная вода имеет меньшую минерализацию.

Помимо рассмотренных условий, на химический состав воды в конкретной обстановке воздействует еще целый ряд более мелких косвенных факторов, определяемых типом водного объекта и окружающими условиями. Химический состав воды в водоемах и водотоках не может быть одинаковым на всем их протяжении. Изменения, происходящие в течение года в характере питания, интенсивности инсоляции, испарении, интенсивности биологических процессов, создают непрерывное изменение химического состава воды во времени – в течение года и даже суток. Степень этого изменения у различных типов водных объектов зависит от их размера и ряда других условий, особенно заметно и быстро проявляясь, например, у небольших рек. Поэтому химический состав природных вод так разнообразен.

Наблюдающаяся систематическая изменчивость состава воды во времени и ее закономерности составляют гидрохимический режим водного объекта, изучение которого является одной из важнейших задач гидрохимии. Таким образом, гидрохимический режим теснейшим образом связан с водным режимом, а водный баланс является основой для составления баланса химических веществ водных объектов.



Для описания связи между гидрологическими и гидрохимическими характеристиками необходимо рассмотреть изменение концентрации вещества  $C$  во времени  $t$  относительно условно устойчивого состояния (с математическим ожиданием, равным  $C_g$ ) на основе решения системы дифференциальных уравнений (3.1), (3.2) [91]. Используя так называемое «цепное правило» дифференцирования сложной функции, запишем уравнение (3.3):

$$\frac{dC}{dt} = k_C \cdot C, \quad (3.1)$$

$$\frac{dQ}{dt} = k_Q \cdot Q, \quad (3.2)$$

$$\frac{dC}{dQ} = \frac{k_C}{k_Q} \cdot \frac{C}{Q}, \quad (3.3)$$

где  $k_C$  и  $k_Q$  – значения удельной скорости изменения концентрации вещества и расхода воды соответственно. Величина  $k_C$  обычно рассматривается как экспоненциальная или степенная функция температуры воды и/или скорости течения. Величина  $k_Q$  в общем случае является нелинейной функцией расхода воды, хотя часто принимается как константа. С учётом этого представим отношение  $k_C$  и  $k_Q$  в виде нелинейной функции от расхода воды (3.4), что позволяет в результате интегрирования (3.3) получить уравнение (3.5):

$$\frac{k_C}{k_Q} = k_0 + k_1 \cdot \left( \frac{Q}{Q_0} \right)^{k_2}, \quad (3.4)$$

$$Y = X^{k_0} \cdot \exp\left( \frac{k_1}{k_2} \cdot (X^{k_2} - 1) \right), \quad (3.5)$$

где  $k_0, k_1, k_2$  – эмпирические коэффициенты;  $Y = C/C_0$  и  $X = Q/Q_0$  – модульные коэффициенты концентрации и расхода воды;  $C_0$  и  $Q_0$  – математическое ожидание концентрации вещества и расхода воды; математическое ожидание величин  $Y$  и  $X$  равно 1; стандартное отклонение  $X$  представляет собой коэффициент вариации расхода воды  $Cv(Q)$ .

Используя разложение в ряд Тейлора (до второй производной  $Y''$ ) и принимая математическое ожидание для расхода воды равным его среднему арифметическому, получим выражение для среднего арифметического  $C_a$  и стандартного отклонения  $\sigma(C)$  в виде

$$\frac{C_a}{C_0} \approx 1 + \frac{1}{2} \cdot (k_0 \cdot (k_0 - 1) + k_0 \cdot k_1 + k_1 \cdot (k_0 + k_2 - 1) + k_1^2) \cdot Cv^2(Q), \quad (3.6)$$

$$\sigma(C) \approx |k_0 + k_1| \cdot C_0 \cdot Cv(Q). \quad (3.7)$$

Очевидно, что (с учётом приближения  $\sqrt{1+x} \approx 1+x/2$ ) величина  $C_0$  в общем случае лучше аппроксимируется не средним арифметическим,

а, как и в случае длительного контакта воды и породы в отсутствие выраженного течения, средним геометрическим (то есть  $C_0 \approx C_g$ ).

Апробация модели (3.5) проведена по данным совместных гидрологических и гидрохимических наблюдений на реках бассейна реки Обь (р. Андарма – с. Панычево, р. Бакчар – с. Гореловка, р. Большой Юган – с. Угут, р. Вах – с. Лобчинское, р. Верхняя Терсь – с. Осиновое Плёсо, р. Икса – с. Плотниково, р. Иня (нижняя) – с. Кайлы, р. Ишим – г. Петропавловск, р. Кенга – п. Центральный, р. Кеть – п. Максимкин Яр, р. Кия – г. Мариинск, р. Кондома – с. Кузедеево, р. Мрас-Су – г. Мыски, р. Обь – г. Калачинск, р. Пайдугина – с. Берёзовка, р. Парабель – с. Новиково, р. Песчаная – с. Точирино, р. Тайдон – п. Медвежка, р. Тара – с. Муромцево, р. Тобол – г. Кустанай, р. Тым – с. Напас, р. Уса – г. Междуреченск, р. Четь – с. Конторка, р. Чузик – с. Осипово, р. Шегарка – с. Бабарыкино, р. Яя – пгт. Яя), а также р. Турухан – п. Янов Стан (левый приток реки Енисей, лесотундра). Количество использованных при расчётах проб совместных гидрологических и гидрохимических наблюдений – 983. Оценка параметров выполнена методом наименьших квадратов по линеаризованным рядам с предварительным выбором значения  $k_2$ . В результате были получены следующие результаты: квадрат корреляционного отношения между фактическими и вычисленными значениями  $R^2 = 0,63$ ;  $k_0 = -0,376 \pm 0,011$ ;  $k_1/k_2 = -0,010 \pm 0,002$ . Параметр  $k_2$  принят в размере  $(-1,1)$  при условии достижения максимума  $R^2$ . Фрагмент кривой связи  $Y$  и  $X$  представлен на рис. 3.1.

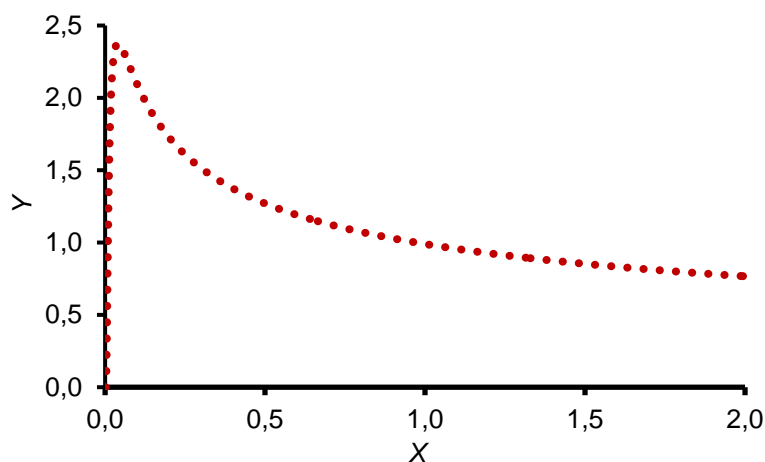


Рис. 3.1. Фрагмент кривой связи величин  $Y$  и  $X$  для средних рек в бассейне Оби;  $Y = C/C_g$ ;  $X = Q/Q_a$

Таким образом, модель (3.5) может использоваться для объяснения материалов наблюдений, включая случаи, когда сумма главных ионов возрастает сначала одновременно с увеличением модулей водно-

го стока  $M_Q$  (от истока реки до какого-либо створа), а затем (вплоть до устья) – обратно пропорционально  $M_Q$ . Например, подобное распределение отмечено для ряда малых горных рек, в частности реки Актру в Российской Федерации (элемент речной системы «Актру–Чуя–Катунь–Обь»), и малых водотоков в бассейне р. Хонгха во Вьетнаме. Однако чаще всего измерения и гидрохимические расчёты проводятся при значениях  $Y$  и  $X$ , соответствующих обратной степенной зависимости, когда экспоненциальной компонентой уравнения (3.5) можно пренебречь, что позволяет упростить выражение для оценки стандартного отклонения концентраций веществ при отсутствии или недостаточности наблюдений.

Анализ структуры модели (3.5) и результатов её апробации показал, что наиболее значительные изменения химического состава вод (свыше 0,5 % по сравнению с предыдущим значением) приурочены к диапазону колебаний модулей водного стока до 0,5...1,0 л/(с·км<sup>2</sup>) с учётом специфики природных зон [83]. Так, изменения более чем на 5 % наблюдаются при модулях водного стока менее: 0,03 л/(с·км<sup>2</sup>) – в лесостепи; 0,05 л/(с·км<sup>2</sup>) – в тайге; 0,04 – в горных районах. Это позволяет предположить, что базовые химические реакции и физико-химические процессы, определяющие основные особенности химического состава вод, устанавливаются на стадии формирования склонового, подповерхностного и подземного стока. На стадии руслового стока перечень этих реакций, видимо, меняется в зависимости от скорости движения водных масс (например, в течение года), но уже не так значительно. Причём скорость течения, в свою очередь, зависит от шероховатости и уклонов поверхности (с учётом характерных значений этих параметров для разных природных зон). Вследствие этого при фиксированном модуле водного стока (в [83] было принято значение 1 л/(с·км<sup>2</sup>)) в зоне тайги время добегания и, соответственно, комплекс реакций и содержание растворённых солей в речных водах будут больше соответствующих показателей для горно-таёжных районов (за счёт меньших уклонов) и меньше, чем для лесотундры и тундры (из-за меньшей шероховатости водосборной поверхности).

### **3.1.8. Взвешенные вещества**

Химическая и механическая эрозии характеризуются стоком взвешенных наносов и являются лишь разными формами проявления одного и того же процесса – водной эрозии земной поверхности. Поэтому ионный сток и сток взвешенных наносов имеют много общего в генетических факторах. Однако значимость последних для каждого из видов стока не всегда равноценна. Для обоих видов стока имеют значение

климатические условия, характер почвенного покрова и пород, однако для стока наносов по сравнению с ионным стоком большую роль играет рельеф местности, уклоны русла и скорость течения, а также вид растительности.

Причиной существенного различия в переносе взвешенных наносов и растворенных соединений является их неодинаковая стабильность в водном растворе. Взвешенные вещества, как бы дисперсны они ни были, неустойчивы в растворе, и седиментация их является вопросом времени, поэтому они переносятся водой на значительно меньшие расстояния, чем растворенные вещества.

Ввиду того что взвешенные наносы являются продуктом механической эрозии, протекающей на водосборе, их состав близок к составу почв и пород, слагающих водосбор. Наиболее высокодисперсные их частицы диаметром 0,05 мм и менее обладают теми же обменными свойствами, что и почвы, и породы, из которых образовались взвешенные вещества. Поэтому в воде взвешенные вещества несколько изменяют свой состав по сравнению с составом материнских почв и пород. Этому способствуют и такие внутриводоемные процессы, как распределение наносов в потоке по крупности и плотности, а за счет этого в какой-то степени происходит распределение по минералогическому составу.

Взвешенные наносы при осаждении частично увлекают с собой (соосаждают и сорбируют) продукты окисления органических веществ, гидроксиды металлов, некоторые загрязняющие вещества, чем также способствуют в некоторой степени изменению химического состава воды. В процессе переноса и переотложения в водных объектах взвешенные наносы частично истираются и еще больше диспергируются, что способствует их частичному растворению. Все это указывает на довольно активное участие взвешенных наносов в формировании химического состава природных вод.

### ***3.1.9. Донные отложения***

Донные отложения образуются из оседающих наносов, и разделение этих двух состояний твердого вещества несколько условно, так как в определенные моменты времени в зависимости от крупности частиц и скорости потока наносы могут оседать на дно или переходить во взвешенное или влекомое состояние. Переходу во взвешенное состояние способствует турбулентность потока, вызываемая ветром и повышением уровня воды. Накопление донных отложений происходит при снижении скорости течения потока, что особенно заметно при впадении рек

в озера и водохранилища, где, как правило, донные отложения в большей степени участвуют во внутриводоемных процессах, чем в реках.

Помимо отложений наносов, поступающих из основной реки и притоков, выпадающих в озера и водохранилища, значительный объем отложений образуется в результате отмирания водной растительности, илообразования, а в сравнительно «молодых» водохранилищах также за счет подмыва и обрушения их берегов.

Донные отложения содержат большое количество минеральных компонентов и органических веществ в высокодисперсном состоянии и поэтому представляющих собой хорошую питательную основу, на которой активно развиваются бактерии и более высокоорганизованные животные организмы.

Между донными отложениями и водой происходит непрерывный процесс обмена, при котором в отложения переходят взвешенные наносы, коллоиды гидроксидов металлов, отмершие растительные и животные остатки, продукты окисления органических веществ. Частично могут оседать инородные для природных вод вещества (загрязняющие) и т. д. Из донных отложений в воду могут поступать ранее осевшие вещества в случае изменения гидродинамических условий. Кроме того, из донных отложений могут переходить в воду образовавшиеся в иле газы ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ), перешедшие в растворенное состояние соединения азота, фосфора, некоторые металлы, карбонаты, сульфаты, хлориды и др. Очень важное значение имеет возможное влияние донных отложений на химический состав воды в виде так называемого вторичного загрязнения, когда ранее перешедшие из воды в донные отложения загрязняющие вещества в результате окислительно-восстановительных процессов, сдвига физико-химического равновесия между донными отложениями и водой, под влиянием биохимических и других процессов могут вновь переходить из отложений в раствор или в процессе превращения давать ядовитые растворимые продукты. При этом водный объект, как будто справившийся с загрязняющими веществами в процессе самоочищения, вновь оказывается загрязненным. Этот чрезвычайно важный процесс мало изучен и требует к себе пристального внимания.

Вопрос направленности потока циркуляционного обмена подвижных форм элементов в системе «вода – донные отложения» является очень сложным и не всегда однозначно определяемым. Помимо гидродинамических факторов, в основном регулирующих условия взаимодействия водного потока с массой донных отложений, большое значение имеет окислительно-восстановительный потенциал воды и особенно донных отложений. При четко выраженных окислительных условиях  $E_h = +500$  мВ.

Резкое влияние донных отложений на качество воды возможно только в случае взмучивания слоя загрязненных донных отложений, когда определяющим в процессе циркуляции является турбулентная диффузия. Без определяющего воздействия гидродинамического фактора на взаимодействие в системе «вода – донные отложения», находящейся даже в восстановительных условиях, когда резко повышается подвижность различных форм металлов, их миграционный поток из донных отложений в воду определяется уравнением молекулярной диффузии [43]. В этом случае влияние донных отложений на качество воды может носить длительный характер, хотя и будет иметь значительно меньшие масштабы, чем при турбулентной диффузии.

### **3.2. Процессы формирования химического состава природных вод**

Природная вода, соприкасаясь с породами, атмосферным воздухом и органическим веществом, постоянно изменяет свой химический состав. Такого рода изменения связаны не только с физико-химическими процессами, переводящими вещество в раствор или выводящими его из раствора. Они могут быть вызваны процессами испарения, вымораживания, жизнедеятельности организмов и др.

В самом общем виде основные процессы, формирующие состав природных вод, по принципу их действия разделяют на следующие группы: 1) перенос вещества, осуществляемый по механизму молекулярной и турбулентной диффузии, а также диффузионно-конвективного массопереноса; 2) процессы, переводящие вещество в раствор; 3) процессы, выводящие вещество из раствора; 4) процессы, сочетающие воспроизводство и поглощение растворенного вещества. Перечисленные процессы вызывают метаморфизацию воды, т. е. изменение ее химического состава.

#### **3.2.1. Молекулярная диффузия**

Диффузия – это миграция химического вещества под действием градиента его концентрации (или, более строго, его химического потенциала). Этот процесс следует отличать от конвекции, которая представляет собой перенос вещества при физическом перемещении среды, его содержащей.

Математически диффузия описывается первым и вторым законами Фика. Первый закон:

$$I = D \cdot \text{grad}C ,$$

или в одном направлении

$$I = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x};$$

второй закон:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\operatorname{div} I = \operatorname{div} (D \cdot \operatorname{grad} C),$$

или в одном направлении

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2},$$

где  $I$  – поток вещества, который представляет собой массу, проходящую через единицу площади в единицу времени;  $C$  – концентрация в единицах массы на единицу объема;  $D$  – коэффициент диффузии;  $x$  – линейное расстояние;  $t$  – время;  $\operatorname{div}$  и  $\operatorname{grad}$  – векторные операторы.

Знак «минус» в первом законе Фика указывает на то, что поток направлен противоположно градиенту концентрации. Первый закон Фика служит в основном для расчетов применительно к стационарным системам, в любой точке которых концентрация не изменяется во времени, второй закон – к системам, которые не находятся в стационарном состоянии. Коэффициенты диффузии большинства веществ в водном растворе изменяются от  $10^{-6}$  до  $10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с. В твердых веществах они значительно меньше указанных значений.

Диффузия в водонасыщенных донных отложениях осуществляется в основном через поровый раствор, и ее скорость значительно ниже, чем в чистой воде. В природных системах диффузия ионов в донных отложениях сопровождается адсорбцией или реакциями ионного обмена между донными отложениями и раствором. Общим эффектом таких реакций является снижение скорости миграции ионов по сравнению с расчетными данными, основанными только на процессе диффузии. Все сказанное выше относится к процессу молекулярной диффузии, когда молекулы или ионы диффундируют в статической среде.

### **3.2.2. Турбулентная диффузия**

Огромные массы поверхностных вод никогда не бывают неподвижными, причем движение происходит в виде турбулентных, а не ламинарных потоков. Если в такой водной массе существует градиент концентрации некоторых веществ, то процесс смешения, связанный с турбулентным течением, приводит к переносу растворенного вещества, как и при молекулярной диффузии. Этот процесс называется турбулентной диффузией и математически выражается уравнениями, аналогичными

уравнениям законов Фика, за исключением того, что константа  $D$ , являющаяся теперь коэффициентом турбулентной диффузии, на несколько порядков превышает коэффициент молекулярной диффузии.

### ***3.2.3. Диффузионно-конвективный массоперенос***

В широком смысле под конвекцией понимают тепло- и массоперенос в движущемся потоке. Если диффузия происходит в покоящейся среде, то необходимым условием конвекции является подвижность самой среды, в которой вещество перемещается массовыми потоками. В зависимости от движущей силы различают естественную (или свободную) и вынужденную конвекцию. В случае естественной конвекции перемещение вещества происходит под влиянием градиента температуры и градиента концентрации и вызванного им различия плотностей среды. При вынужденной конвекции массоперенос обусловлен главным образом внешним побудителем и сочетает механическое и диффузионное перемещение вещества.

Такого рода диффузионно-конвективный массоперенос наблюдается всюду, где имеются, во-первых, градиенты напора и, во-вторых, градиенты концентрации растворенных веществ, благодаря которым возникают молекулярные потоки. Итогом конвективной диффузии является смешение вод различного состава и различной минерализации. В зависимости от объема смешивающихся водных масс, а также влияния некоторых других факторов смешение их сопровождается активизацией процессов массопереноса, перевода солей в раствор или вывода вещества из раствора. В итоге нарушается динамическое равновесие, установившееся между водным раствором, вмещающей породой и растворенными газами.

Рассмотренные выше процессы являются в основном внутриводоемными, происходящими в водном объекте в основном с уже имеющимся химическим составом воды.

### ***3.2.4. Процессы, переводящие вещество в раствор***

В естественных условиях вода в чистом состоянии практически не встречается. Химический состав большей части поверхностных и подземных вод является результатом взаимодействия дождевых вод с породами близ поверхности земли и особенно в почвенной зоне. Воды, просачивающиеся через почву, содержат обычно в 10–100 раз больше растворенного диоксида углерода, чем дождевые воды. Этот диоксид углерода является источником кислотности для большинства реакций выветривания. В результате выветривания горных пород образуются оста-



точные продукты и растворимые соли, которые и формируют разнообразный ионный состав природных вод. Воздействие агентов выветривания прежде всего приводит к разрушению горных пород вследствие гидролиза, выщелачивания или растворения.

Под *гидролизом* понимают реакции обменного разложения воды при ее взаимодействии с минералами. Эти реакции приводят к разложению сложных порообразующих минералов и превращению их в менее растворимые (преимущественно глинистые) соединения путем замещения катионов породы на водородный ион воды. Именно гидролизом объясняется переход в раствор ионов из труднорастворимых кристаллических пород (алюмосиликаты, силикаты и т. д.).

*Растворение* вызывает полное разрушение кристаллической решетки минералов и переход всех ионов в раствор. При *выщелачивании* минерал растворяется частично: кристаллическая решетка разрушается, но не все ионы переходят в раствор. По сравнению с растворением выщелачивание представляет собой более общий процесс. Его воздействию подвержены все горные породы.

Переход ионов в раствор зависит от наличия воднорастворимых солей в породах, состава и минерализации воздействующих на породы вод, наличия органических веществ, скорости перемещения водной массы и некоторых других причин. Оба процесса наиболее активно протекают в подвижной среде, когда вода находится в состоянии, далеком от насыщения солями, и соприкасается с вмещающими породами. Решающее значение имеет растворимость соединений и кинетика растворения.

Большую роль играют гидратация и окисление, сопровождаемые деятельностью живых организмов. Все эти формы выветривания представляют собой процессы, формирующие состав природных вод. Выщелачивание, гидратация и окисление всегда сопровождаются противоположными процессами: выпадением в осадок, дегидратацией и восстановлением.

### **3.2.5. Процессы, выводящие вещество из раствора**

Основными процессами удаления растворенного вещества из природных вод считаются осаждение, сорбция, соосаждение, или коагуляция, которая по своему механизму близка к кристаллизации солей.

Осаждение может происходить при пересыщении раствора, при котором отношение произведения активностей продуктов реакции к произведению активностей исходных веществ превышает термодинамическую константу равновесия.

Ионы и молекулы растворенных веществ могут удаляться из ненасыщенных солями природных вод вследствие сорбции, т. е. поглощения их различного рода сорбентами. Концентрация рассеянных элементов в природных водах часто значительно ниже той, которую следовало бы ожидать на основании расчетов равновесной растворимости или их поступления в воду из различных источников. Причиной их низких концентраций является адсорбция элементов на твердой фазе. Многие элементы не образуют насыщенных растворов, и для них сорбция является важнейшим механизмом перевода из раствора в твердую фазу.

Выделяют адсорбцию, когда растворенный ион или молекула присоединяются к поверхности ранее существовавшей твердой фазы, и абсорбцию, когда поглощение осуществляется всей ее массой. К хорошим сорбентам относятся глины, органическое вещество, входящее в состав горных пород, почв и илов (гумус, торф и др.), коллоидные формы кремнезема, гидроксиды марганца, железа и алюминия и др.

Сорбция может быть полярной и неполярной. В случае полярной сорбции отрицательно заряженные сорбенты (глины, органическое вещество) поглощают из воды катионы, а положительно заряженные (гидроксиды алюминия, марганца и железа) – анионы. Полярная сорбция обычно носит обменный характер. Ее разновидностью является ионный обмен. Следует, однако, помнить, что обменное поглощение почти всегда сопровождается необменным, при котором ионы закрепляются на сорбенте. Согласно К.К. Гедройцу, например, в почвах необменного калия и магния всегда больше, чем кальция. Неполярная сорбция заключается в поглощении из раствора молекул вещества. Таково поглощение глинами и почвами газов и водяных паров.

Адсорбция переходных металлов на оксидах и гидроксидах (особенно алюминия, железа и марганца) сильно связана с рН среды и становится значительной в интервале значений рН гидролиза соответствующего металла.

Осадок, состоящий из частиц гидроксидов марганца и железа малого размера, характеризуется большой площадью взаимодействия (около  $200 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и, соответственно, высокой способностью к адсорбции ряда тяжелых металлов. Но процесс поглощения на оксидах марганца нельзя рассматривать как простую адсорбцию. Поглощение, вероятно, включает также фазовые переходы оксидов марганца и катализ окислительно-восстановительных реакций. Там, где концентрации рассеянных элементов контролируются адсорбцией на оксидах марганца и железа, можно ожидать, что концентрация растворенных веществ зависит от значений Eh и рН. Если оксиды растворяются вследствие восстановления, то все адсорбированные металлы высвобождаются.

*Соосаждение* – это включение растворенных элементов в качестве второстепенного компонента в твердую фазу в момент ее осаждения. В природных системах, включающих гидроксиды марганца и железа, часто невозможно провести различие между адсорбцией и соосаждением. На практике свободно используются оба термина, которые подразумевают под собой один и тот же процесс.

Кристаллизация солей из воды способствует изменению геохимической обстановки, за счет чего концентрации ионов солей достигают произведения растворимости. К таким изменениям относятся концентрирование, выделение газов, сдвиг термодинамического, кислотно-щелочного и окислительно-восстановительного равновесия, смешение водных масс различного состава.

При испарении или вымораживании океанических, морских, озерных и других видов вод происходит концентрирование, приводящее к выпадению солей. С увеличением концентрации выпадение солей происходит в следующей последовательности: карбонатные, сульфатные и, наконец, хлоридные. Такое явление свойственно солеродным бассейнам.

Выпадение карбонатов большей частью связано с дегазацией природных вод, изменением температуры, увеличением степени испарения. Общий эффект испарения состоит в удалении из раствора чистой воды, поэтому концентрации всех растворенных компонентов при испарении возрастают. Хотя испарение происходит во всех климатических зонах, однако только в относительно аридных условиях концентрирование растворенных веществ становится главным фактором, контролирующим состав воды.

Кристаллизация солей в процессе концентрирования природных вод аридной зоны сопровождается выпадением не только карбонатов и сульфатов, но и хлоридов кальция, магния, натрия, что приводит к образованию солончаков.

### **3.2.6. Обменные процессы вещества**

Химический состав воды во многом зависит от процессов, которые переводят одно вещество в раствор и одновременно выводят другое из раствора (ионный обмен, окислительно-восстановительные и биогеохимические реакции).

Ионный обмен – это процесс поглощения твердым веществом, т. е. адсорбции или абсорбции, из воды одних ионов и замены их другими, находящимися в твердом веществе (глинистые минералы, органическое вещество природных вод). Реакции ионного обмена обратимы. Их дви-

жущей силой является стремление к установлению химического равновесия между взаимодействующими фазами. Обменные ионы, сосредоточенные на поверхности сорбента, называются поглощающим комплексом. Степень дисперсности твердой фазы увеличивает ее способность к обмену. Немалую роль играет в этом и состав сорбента, в частности минералогический состав пород. Наибольшая обменная способность у монтмориллонита, наименьшая – у каолинита. Ионный обмен подчиняется закону действующих масс и протекает в эквивалентных количествах: с увеличением концентрации ионов в растворе возрастает ионный обмен [14].

Энергия обменно-адсорбционных реакций зависит от валентности катионов. Сильно поглощаются многовалентные ионы, слабее – одновалентные. Среди ионов одинаковой валентности энергия поглощения падает с уменьшением относительной атомной массы и радиуса иона:



Направленность катионного обмена зависит от гидрохимической обстановки. Катионообменные реакции на глинистых минералах и цеолитах также могут поддерживать концентрации рассеянных элементов в воде на низких уровнях. Интуитивно трудно ожидать, что эти процессы могут иметь существенное значение, так как главные катионы ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^{3+}$ ,  $K^+$ ) должны конкурировать с рассеянными металлами за адсорбционные позиции твердой фазы и вытеснять эти металлы в раствор. Однако избирательность ионообменного материала к данному иону может быть такой высокой, что ион будет удаляться из раствора, даже если он находится в очень низкой концентрации. Исследований адсорбции рассеянных элементов на глинах ещё недостаточно, чтобы делать обобщение. По-видимому, в окислительных условиях адсорбция на гидроксидах марганца и железа является более важной.

*Адсорбция на твёрдом органическом веществе.* Растворённое органическое вещество природных вод включает широкий круг соединений – от относительно небольших растворимых молекул до нерастворимых полимерных материалов типа угля и дерева. Концентрация растворённого органического вещества в почвенных растворах обычно много больше, чем в реках и озёрах.

Ту часть вещества в щелочной вытяжке из почвы и торфа, которая после подкисления вытяжки выпадает в осадок, называют гуминовыми кислотами, а оставшуюся в растворе – фульвокислотами. Средняя относительная молекулярная масса гуминовых веществ в речной воде равна 1269, а отдельных фракций, выделенных с помощью хроматографии, – 528–3095. Гуминовые кислоты представляют собой главным образом

высокомолекулярные полимеры с большим числом карбоксильных и фенольных функциональных групп.

Органическое вещество обычно сильно взаимодействует с рассеянными металлами, образуя с ними комплексы хелатного типа. Таким образом, образование комплексов с растворенным органическим веществом может сопровождаться неожиданно высоким содержанием металлов в растворе, а с твердым – удалением металлов из раствора. Присутствие в растворе органических лигандов также вносит изменения в адсорбцию рассеянных металлов на оксидах и поверхности глинистых минералов.

Если ион металла в растворе сильно закомплексован, его адсорбция может быть подавлена, но в некоторых системах она в действительности даже увеличивается за счет образования тройных металл-лиганд-поверхностных комплексов. В настоящее время детали адсорбции рассеянных металлов на твердом органическом веществе изучены так мало, что никаких точных количественных предсказаний сделать нельзя.

*Поглощение живыми организмами.* Для элементов, используемых организмами в относительно больших количествах (N, P, иногда C, K, Ca, Si), биологические процессы в поверхностных водах часто являются доминирующим фактором, регулирующим содержание в них указанных элементов. Для элементов, используемых в малых количествах (Mn, Cu, Ni, Mo, Se), поглощение организмами, вероятно, значительно влияет на концентрации элементов в растворах только в природных водах, где эти концентрации вообще являются низкими. В воде, где их концентрации высоки, например в загрязненных сточных водах, количества элементов, удаляемые организмами, по-видимому, незначительны, по сравнению с их количествами в растворе или количествами, удаляемыми процессами адсорбции.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Дайте определение понятия «формирование химического состава природных вод».
2. Перечислите факторы формирования химического состава природных вод.
3. Как происходят процессы формирования химического состава природных вод?
4. Запишите уравнение турбулентной диффузии в нестационарном потоке.
5. Какие связи существуют между характеристиками гидрохимического и водного режима водных объектов?

6. В чем заключаются связи между характеристиками гидрохимического режима, режима твёрдого стока, минералогическим, химическим и гранулометрическим составом водовмещающих пород или донных отложений?
7. В чем заключается методология оценки направленности геохимических процессов на основе методов химической термодинамики? Перечислите её достоинства и недостатки.
8. Какие вы знаете виды антропогенного влияния на химический состав атмосферных, речных, озерных и подземных вод? Как соотносятся природные и антропогенные факторы формирования химического состава природных вод?
9. Напишите уравнение гидрохимического баланса речного бассейна.
10. Напишите уравнение гидрохимического баланса водотока.

## 4. ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД

### 4.1. Формирование ионного состава

Главными компонентами минерального состава природных вод являются ионы солей соляной, серной и угольной кислот с металлами натрием, калием, магнием и кальцием. Они составляют в пресных водах свыше 90...95 %, а в высокоминерализованных – свыше 99 % всех растворенных веществ. Обычно нижним пределом концентрации для главных ионов считают 1 мг/дм<sup>3</sup>, поэтому в ряде случаев, например для морских и некоторых подземных вод, к главным компонентам можно отнести также  $\text{Br}^-$ ,  $\text{B}^{3+}$ ,  $\text{Sr}^{3+}$  и др. Однако ионная форма главных компонентов свойственна в полной мере лишь маломинерализованным водам. При увеличении концентрации между ионами усиливается взаимодействие, направленное на ассоциацию, т. е. процесс, обратный диссоциации. При этом образуются ассоциированные ионные пары, нейтральные ( $\text{CaSO}_4^0$ ,  $\text{MgSO}_4^0$ ,  $\text{CaCO}_3^0$ ) или несущие заряд ( $\text{MgHCO}_3^+$ ,  $\text{CaHCO}_3^+$ ).

Происхождение анионного состава воды связано главным образом с газами, выделявшимися при дегазации мантии. Состав этих газов сходен с составом современных вулканических газов, что подтверждает сопоставление вулканических газов с газами, растворенными в веществе метеоритов и изверженных пород. Следовательно, как в прошлом, так и теперь в атмосферу наряду с водяным паром поступают газообразные водородистые соединения хлора ( $\text{HCl}$ ), азота ( $\text{NH}_3$ ), серы ( $\text{H}_2\text{S}$ ), брома ( $\text{HBr}$ ), углерода ( $\text{CH}_4$ ) и кислородные соединения углерода ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ ).

На протяжении многих миллионов лет в атмосферу поступали азот, диоксид углерода, водород и кислород. Из этих газов наиболее устойчивым был азот, содержание остальных трех газов уменьшалось по мере их возникновения. Так, диоксид углерода связывался при фотосинтезе и при химическом выветривании кристаллических пород, водород терялся как наиболее легкий газ в космическом пространстве (так называемый процесс диссипации), а кислород расходовался на окислительный процесс, в частности окисление соединений железа и газов. Важнейшим моментом было установление в атмосфере постоянного содержания кислорода, который ознаменовал собой новый этап эволюции атмосферы – появление окислительной атмосферы. В воде появились сульфатные, нитратные ионы и анионы других кислородных кислот. К процессам химического выщелачивания алюмосиликатов прибавилось окисление сульфидов и серы на материке. На дне высыхающих континентальных морей образовались отложения гипса, ангидрита.

Происхождение катионов природных вод связано с изверженными кристаллическими породами, хотя, возможно, часть катионов выносилась и непосредственно из недр земли. Разложение изверженных пород происходило под действием воды, усиливаемым присутствием кислых продуктов, поступающих из недр земли. Образовавшиеся на земле продукты сносились текучими водами в моря и океаны. По химическому составу изверженные кристаллические породы, слагающие основную часть земной коры, преимущественно принадлежали к алюмосиликатам сложного состава, по минералогическому составу – главным образом к полевым шпатам (63...65 %) (табл. 4.1).

Таблица 4.1

*Главные породообразующие минералы всех изверженных пород  
(по А.Н. Заварицкому)*

Минерал	% общего состава
Кварц	2...12
Плагиоклаз (альбит, анортит)	47
Ортоклаз	16...18
Роговая обманка, биотит или пироксен	19...20
Магнетит и апатит	5

Несмотря на кажущуюся прочность изверженных пород, с течением времени они медленно подвергались распаду, который не совсем точно называют выветриванием. Сначала происходит физическое выветривание, т. е. размельчение породы под действием колебаний температуры, растрескивание при замерзании воды, механическое истирание и пр. Затем начинается процесс химического выветривания.

При наличии анионов кислот (угольная, соляная или серная) образуется не гидросиликат, а соль соответствующей кислоты ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  или  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{CaSO}_4$ ), а кремниевая кислота выделяется в виде  $\text{SiO}_2$  или более сложного минерала.

Таким образом, в результате химического выветривания, с одной стороны, образуются нерастворимые продукты выветривания, в частности глинистые минералы (каолинит, монтмориллонит, галлуазит, гидрослюда и др.) и разновидности оксида кремния (кварц, опал и др.), с другой – различные растворимые в воде гидрокарбонатные или сернокислые, или хлористые соли, образующие в растворе  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  (при окислении сульфидов). Кроме того, образуются  $\text{HSiO}_3^-$ , недиссоциированная кремниевая кислота  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ . В небольшом количестве переходят в раствор также ионы других элементов. Следовательно, катионы природной воды образовались преимущественно в процессе разложения алюмосиликатов земной коры, с чем и связано преобладание в



катионном составе  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$ , а анионы – в процессе разложения главным образом продуктов дегазации мантии.

Под влиянием климатических и других условий ионный состав природных вод изменяется и приобретает характерные черты, иногда специфические для различных видов природных вод (атмосферные осадки, реки, озера подземные воды).

#### **4.1.1. Атмосферные осадки**

Атмосферные осадки из всех природных вод наименее минерализованы, но по химическому составу растворенных в них веществ они не менее разнообразны, чем другие природные воды. Источником их состава являются аэрозоли атмосферы. Аэрозоли – это пылевидные минеральные частицы коры выветривания, высокодисперсные агрегаты растворимых солей различной степени увлажненности, мельчайшие капли растворов газовых примесей ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  и др.), частицы дыма, органические вещества самого разного состава и, наконец, мельчайшие организмы и их остатки (споры, пыльца растений, микробы и др.). По химическому составу аэрозоли отражают состав подстилающей поверхности, а также процессы взаимодействия в атмосфере твердого вещества и воды. Ионный состав их довольно разнообразен.

При колебаниях средней многолетней минерализации атмосферных осадков в европейской части РФ в пределах  $10 \dots 20 \text{ мг/дм}^3$  и экстремальных значениях для всей территории  $3 \dots 4$  и  $50 \dots 60 \text{ мг/дм}^3$  ионный состав характеризуется пестротой, причем среди анионов большей частью преобладает  $\text{SO}_4^{2-}$  или  $\text{HCO}_3^-$ , а среди катионов в зависимости от степени удаленности от побережья  $\text{Ca}^{2+}$  или  $\text{Na}^+$ . Непосредственно у побережья при ветре, дующем с моря, в результате ветрового механического выноса солей концентрация хлора в осадках бывает повышенной. По мере удаления от побережья относительная концентрация  $\text{Cl}^-$  падает, а  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , наоборот, повышается. Причиной повышения содержания  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Ca}^{2+}$  является обогащение атмосферы аэрозолями континентального происхождения.

По мере продвижения вглубь континента часть морских аэрозолей вымывается. Наибольшие изменения испытывает концентрация  $\text{SO}_4^{2-}$ . Если увеличение содержания  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$  связано, скорее всего, с минеральной пылью почв и пород, на поверхности которых всегда присутствуют эти соли, то увеличение содержания  $\text{SO}_4^{2-}$  обусловлено, с одной стороны, окислением  $\text{SO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$ , с другой – поднятием сернокислых солей с засоленных поверхностей. Не поддаются даже приблизительной оценке громадные количества солевых частиц, поднимаемых с почв, со-

ляных озер, поверхности льда, удобрений (суперфосфата) и, наконец, выбрасываемых химическими и металлургическими производствами.

#### **4.1.2. Речные воды**

Воды большинства рек принадлежат к гидрокарбонатному классу. Площадь, занимаемая бассейнами этих рек, составляет около 83 % территории Северной Евразии. По составу катионов эта вода относится почти исключительно к группе кальция; гидрокарбонатные воды с преобладанием магния и натрия – крайне редкое явление.

Из природных вод гидрокарбонатного класса наиболее распространены воды малой минерализации. Они занимают значительную площадь на севере европейской части и большую территорию азиатской части РФ, особенно в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Их распространение повсеместно совпадает с залеганием почв тундры, бедных растворимыми солями, но обогащающих воды органическими веществами, а на востоке территории большая часть относится, кроме того, к зоне многолетней мерзлоты.

Значительно меньше распространены природные воды средней минерализации. Они занимают почти всю среднюю полосу европейской части РФ в зоне лесов и лесостепей. Еще меньше площадь, занимаемая бассейнами рек с водами повышенной минерализации. Они распространены преимущественно на юге европейской части РФ в зонах лесостепей и степей. Эти реки дренируют типичные и тучные черноземы, часто залегающие на плотных карбонатных породах с многочисленными вкраплениями, солодей.

Гидрокарбонатные воды с минерализацией свыше 1000 мг/дм<sup>3</sup> встречаются очень редко. Это связано с особенностями растворения и существования в растворе гидрокарбонатов кальция и магния. Для поддержания в растворе этих соединений необходимы, соответственно, значительные концентрации диоксида углерода. Например, для воды, содержащей около 5 ммоль НСО<sub>3</sub><sup>-</sup> при 4 ммоль Са<sup>2+</sup>, требуется не менее 2 ммоль СО<sub>2</sub>, т. е. 88 мг/дм<sup>3</sup>. Отсюда становится понятной ограниченность концентрации НСО<sub>3</sub><sup>-</sup> в поверхностных водах, редко превышающей в реках 250 мг/дм<sup>3</sup>, так как столь высокая концентрация диоксида углерода неустойчива в поверхностных водах из-за малого парциального давления этого газа в атмосфере. Все же вследствие непрерывного поступления в воду диоксида углерода при разложении органических веществ в почвах и медленного установления абсорбционно-гидратационного равновесия СО<sub>2</sub> в воде и атмосфере и, наконец, вследствие возможности существования пересыщенных растворов карбоната

кальция речные воды с содержанием  $\text{HCO}_3$  до 3...4 ммоль/дм<sup>3</sup> (180...240 мг/дм<sup>3</sup> в пересчете на количество вещества эквивалентов) практически устойчивы.

Реки с водой, относящейся к сульфатному классу, сравнительно малочисленны. Они распространены преимущественно в степной полосе и частично в полупустынях. Общая площадь, занимаемая бассейнами этих рек, составляет примерно 3...4 % речных бассейнов бывшего СССР. К ним относятся также реки, расположенные значительно севернее, например в бассейне Онеги и Чусовой, в районе Средней Волги. В составе катионов природных вод сульфатного класса, так же как и в водах гидрокарбонатного класса, преобладает кальций. Однако ряд рек сульфатного класса относится к группе натрия. По минерализации воды сульфатного класса значительно превосходят воды гидрокарбонатного класса. Речные сульфатные воды с малой и средней минерализацией встречаются сравнительно редко. Наиболее характерна для этих рек повышенная, а иногда и высокая минерализация воды. В отдельных случаях общее содержание ионов в ней достигает 4 ‰ и даже превышает 5 ‰ (р. Кума).

Реки, воды которых относятся к хлоридному классу, встречаются почти так же редко, как и реки, в воде которых преобладают сульфаты. Площадь бассейнов этих рек составляет около 7 % площади всех бассейнов, причем они расположены почти в одном массиве – от нижнего течения р. Волги на западе до верховьев р. Оби на востоке. К этой территории относятся преимущественно степные районы и полупустыни. Преобладающими катионами природных вод хлоридного класса являются главным образом ионы натрия. Воды хлоридного класса отличаются высокой минерализацией – свыше 1000 мг/дм<sup>3</sup>, реже от 500 до 1000 мг/дм<sup>3</sup>.

Приведенная характеристика ионного состава речной воды относится к периоду летней межени. До некоторой степени она характеризует состав и в период ледостава. Существенно иная, значительно меньшая минерализация воды, разумеется, наблюдается в период весеннего половодья.

В распределении ионного состава речной воды на территории Северной Евразии наблюдается определенная закономерность. Имеется общая тенденция к увеличению минерализации воды на большей территории европейской части РФ с севера на юг и с запада на восток, а в северной части Азии – с севера на юг с максимально минерализованными водами в районах Северного Казахстана, южной части Западной Сибири и Южного Приуралья. Зональность ионного состава речных вод объясняется не только действием климатических условий настоящего време-

ни, но и в значительной мере климатом прошлого. Степень выщелоченности почв и пород, наличие в них легкорастворимых солей или засоленность почв – это естественный результат многовекового воздействия соответствующих климатических условий. Нарушают зональность химического состава воды рек на территории Северной Евразии различия состава пород и условий их залегания.

### **4.1.3. Озёрные воды**

Минерализация и химический состав воды озёр в отличие от рек меняется в очень широких пределах. Реки с минерализацией воды свыше 0,1...0,2 ‰, в каких бы условиях они ни находились, – очень редкое явление, в то время как минерализация воды озёр бывает от очень низкой, в несколько десятков мг/дм<sup>3</sup> (т. е. мало отличающейся от дождевой), до очень высокой – 30...35 ‰ (соляные озера с рассолом, до предела насыщенным солями).

Различие в минерализации отражается и на ионном составе воды озёр. В нем наблюдаются закономерности, которые свойственны и составу речной воды. С увеличением минерализации озерной воды происходит относительный рост ионов в ее составе в такой последовательности:  $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$ ;  $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Na}^+$ .

При минерализации до 500...1000 мг/дм<sup>3</sup> в озерной воде преобладают гидрокарбонатные ионы, свыше 1 ‰ – чаще всего сульфатные, а по достижении 3...5 ‰ в зависимости от литологических особенностей водосборной площади – сульфатные или хлоридные воды. В составе катионов озерных вод преобладающая роль кальция сохраняется лишь до 1...2 ‰. При дальнейшем росте минерализации эту роль начинают играть ионы натрия. Ионы магния, так же как и во всех других водах, сохраняют при всех минерализациях промежуточное положение. Причина подобного распределения ионного состава заключается в различной растворимости солей. Подавляющая часть пресных озёр, так же как и рек, по составу вод гидрокарбонатно-кальциевые. К ним, например, относятся такие крупнейшие озера на территории РФ, как Байкал, Ладожское, Онежское, Таймыр, и зарубежные – Верхнее, Гурон, Мичиган, Виктория, Танганьика.

### **4.1.4. Подземные воды**

Исключительным разнообразием химического состава, в том числе и ионного, отличаются подземные воды. Состав воды бывает всех классов, групп и типов [108]. Ионный состав подземных вод зависит, прежде всего, от условий их формирования и залегания, в том числе (согласно

[43]) от генетического типа и генетического цикла подземных вод. Еще в 1947 г. Г.Н. Каменский выделил три генетических цикла формирования подземных вод:

1. *Инфильтрационный*, или континентальный, связанный с инфильтрацией атмосферных осадков и комплексом геохимических процессов, протекающих в верхней зоне земной коры.

2. *Морской*, или *осадочный*, связанный с захоронением морских вод в процессе осадкообразования и с дальнейшей их метаморфизацией.

3. *Метаморфический и магматический* циклы, определяющие формирование глубинных вод. В силу того, что до настоящего времени различить магматические и метаморфические воды практически невозможно, имеет смысл объединить рассматриваемые два цикла в один – метаморфогенно-магматический.

Конкретные проявления того или иного цикла воды не всегда можно выделить в чистом виде, так как они взаимодействуют между собой, что приводит к смещению различных генетических типов воды. Примером такого взаимодействия циклов может служить вытеснение седиментогенных вод инфильтрационными, смешение возрожденных вод с ювенильными, седиментогенными, инфильтрационными и т. д.

Среди выделенных генетических циклов Г.Н. Каменский более подробно охарактеризовал инфильтрационный, выделив в зависимости от направления генетических процессов три генетических типа вод: 1) грунтовые воды выщелачивания, формирующиеся в условиях достаточно интенсивного развития процессов инфильтрации атмосферных осадков; 2) грунтовые воды континентального засоления, формирующиеся в засушливых степных и пустынных равнинах под влиянием интенсивного испарения и процессов взаимодействия с засоленными почвами; 3) артезианские воды выщелачивания, подразделяющиеся на два подтипа: пластовые воды артезианских бассейнов платформенных депрессий и пластово-трещинные, трещинно-жильные и трещинные воды горноскладчатых областей.

Таким образом, Г.Н. Каменский на примере инфильтрационного цикла показал, что каждый тип вод формируется под влиянием комплекса факторов и процессов, действующих в рамках строго определенного пространства и времени. Последнее контролируется не только характером геологической обстановки, но и длительностью (временем) воздействия на воду того или иного фактора и процесса, т. е. состав подземных вод определяется далеко не только типом горных пород, а целым комплексом геохимических процессов и факторов, проявляющихся в определенной природной обстановке.

Оценивая выделенные Г.Н. Каменским генетические циклы подземных вод с позиций последних достижений гидрогеологии, следует подчеркнуть, что представления о первых двух из них – инфильтрационном и морском – существенно не изменились. Речь может идти только о названии второго цикла, который с современных позиций лучше называть седиментационным, так как захоронение и метаморфизация вод связаны непосредственно с образованием и последующим преобразованием осадка.

Что касается метаморфогенно-магматического цикла внутри подземных вод, то представления о его природе существенно изменились. По современным воззрениям, даже в районах активного вулканизма резко преобладают воды инфильтрационного, а не ювенильного генезиса. Вместе с тем формирование состава таких вод невозможно себе представить без прямого или косвенного участия вулканических процессов и тесного взаимодействия их с вмещающими породами (гидротермальные процессы). Если вулканизм понимать в широком смысле, включающем все явления, которые обусловлены деятельностью магмы как на глубине, так и на поверхности земли, а гидротермальные явления как комплекс процессов, связанных с деятельностью всех глубинных горячих вод независимо от их генезиса, то рассматриваемый цикл воды лучше назвать вулканогенно-гидротермальным. При таком понимании вулканогенно-гидротермальный цикл включает деятельность ювенильных, возрожденных (метаморфогенных и вулканогенных), инфильтрационных и седиментогенных вод, смешанных в той или иной степени.

Взаимосвязи между генетическими циклами, природными обстановками и основными типами вод представлены в табл. 4.2, в которой в обобщенном виде прослеживается связь типов вод, с одной стороны, с характером их движения в земной коре и, соответственно, условиями питания, а с другой – с совокупностью тех природных процессов и факторов, которые контролируют формирование состава вод. Так, формирование грунтовых вод теснейшим образом связано с физико-географическими и биологическими факторами, контролирующими развитие гипергенных процессов в целом и, соответственно, совершенно своеобразных подземных вод. Те же инфильтрационные воды, но имеющие более глубокое залегание и связанные поэтому с процессами эпигенеза, термометаморфизма и гидротермальной деятельности, характеризуются резко отличным составом от вод зоны гипергенеза.

Таблица 4.2  
 Генетические циклы, природные обстановки и типы подземных вод (по Е.В. Пиннекеру и С.Л. Шварцеву [43])

Генетический цикл	Тип круговорота	Природная обстановка	Гидродинамический режим	Характер водообмена	Тип подземных вод	Преобладающий ионно-солевой состав	Общая минерализация, г/л					
Инфльтрационный	Гидрологический	Зона гипергенеза в районах гумидного климата	Инфльтрационный	Весьма интенсивный и интенсивный	Грунтовые воды выщелачивания платформенных образований и складчатых сооружений	$\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$	<1,0 и <0,5					
								Зона гипергенеза в районах аридного климата	Замедленный и затруднённый	Грунтовые воды контин. засоления разной степени солёности	$\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^- - \text{Na}^+$ $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+$	1...10 >10
		Зона гипергенеза в районах развития многолетней мерзлоты		От интенсивного до затруднённого	Подземные воды вымораживания: надмерзлотные межмерзлотные подмерзлотные таликов	$\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ разнообразный	Редко до 30 -/-					
								Зона гипергенеза и низкотемпературного эпигенеза	Замедленный	Артезианские воды платформенных образований: песчано-глинистых карбонатных сульфатных соленосных	$\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$ $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$	<1,0 <2,0 <5,0 100...300

Генетический цикл	Тип круговорота	Природная обстановка	Гидродинамический режим	Характер водообмена	Тип подземных вод	Преобладающий ионно-солевой состав	Общая минерализация, г/л
Седиментационный	Геологический (седиментационный цикл)	Зона седиментации, диагенеза и катагенеза	Элизионный	Затруднённый	Артезианские воды бассейнов нормальной и пониженной солёности:	Cl <sup>-</sup> – Na <sup>+</sup>	10...35
					слабой степени метаморфизации		
Вулканогенно-гидротермальный	Геологический (метаморфогенно-магматический цикл)	Зона галогенеза, катагенеза и катагенеза	Глухой	Весьма затруднённый	Артезианские воды бассейнов соленосных фаций:	Cl <sup>-</sup> – Na <sup>+</sup> – Ca <sup>2+</sup>	35...80
					слабометаморфизованные		
					высокометаморфизованные	Cl <sup>-</sup> – Na <sup>+</sup>	>400
Вулканогенно-гидротермальный	Геологический (метаморфогенно-магматический цикл)	Зона регионального метаморфизма, гидротермальных и магматических процессов	Глухой	Активный по зонам	Глубинные воды (вулкано-генные и метаморфогенные, смешанные с инфилтрогенными) – сероводородно-углекислые	Cl <sup>-</sup> – SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> – Na <sup>+</sup>	5,0...40
					Азотно-углекислые		
					Углекисло-водородные		
					Азотно-углекислые и др.		



Формирование вод седиментационного цикла определяется главным образом литологией водовмещающих пород, составом исходных морских вод и степенью их метаморфизации. Поэтому воды, скажем, лагунных фаций резко отличны от вод морских фаций, а метаморфизованные воды древних бассейнов – от слабометаморфизованных вод молодых бассейнов и т. д. Воздушные газы, проникая вместе с водой в горные породы, в значительной мере определяют облик подземной гидросферы. При этом химически активные газы, участвуя в различных химических реакциях, образуют целую цепь разнообразных вторичных продуктов, в то же время инертные газы могут проникать на большие глубины, существенно не меняя своего состояния, и поэтому служат индикаторами генезиса и путей движения подземных вод.

В пространственном изменении химического состава подземных вод так же, как и для поверхностных вод, проявляются определённые закономерности, которые условно можно разделить на горизонтальную (широтную) и вертикальную. Последняя, по мнению ряда авторов, подразделяется на глубинную (геологическую) и по высоте рельефа (высотную). Прежде всего, необходимо дать определение гидрогеохимической зоны, под которой, согласно [Кирюхин и др., 1993], понимается часть гидрогеологического разреза, содержащая воды определенной минерализации и состава.

Согласно [43], в практике гидрогеохимических исследований принято выделять три гидрогеохимические зоны – пресных (до 1 г/л), соленых (1...35 г/л) и рассольных (более 35 г/л) вод. Для выделения гидрогеохимических подзон можно также использовать границы значений по минерализации. В зоне солёных вод выделяется подзона солончатых (1...3 г/кг), слабосолёных (3...10 г/кг) и сильносолёных (10...35 г/кг) вод. В справочной литературе, учебниках, монографиях встречаются и другие подходы к установлению границ гидрогеохимических подзон. Эти подходы могут быть генетическими, физико-химическими, а также могут учитывать практическое назначение вод. Различные сочетания гидрогеохимических зон в разрезе образуют гидрогеохимический пояс. Гидрогеохимический пояс может быть одно-, двух-, трехзональным и более. Если обозначить зону пресных вод буквой А, соленых – Б, а рассолов – В, то сочетания этих зон в разрезе и, соответственно, гидрогеохимические пояса могут быть, например, такими: А, Б, В, АВ, БВ, АВВ, АБА, АБАБВ и т. д.

**Горизонтальная (географическая) гидрогеохимическая зональность.** Горизонтальная (географическая) зональность может также называться широтной. Этот вид зональности прослеживается от широты к широте, от полюсов к экватору. Вместе с тем можно выделять и дол-

готную зональность (от долготы к долготе). Но она менее контрастна и рассматривается в специфических случаях. Горизонтальная гидрогеохимическая зональность обусловлена изменением условий водно-атмосферного питания в разных ландшафтно-климатических зонах. С севера на юг, например, в европейской части страны уменьшается количество атмосферных осадков, растет испаряемость, увеличивается глубина залегания подземных вод, растет минерализация и изменяется состав вод зоны аэрации и грунтовых вод. Чем более влажным является климат, тем меньше минерализация грунтовых вод. И наоборот, с повышением засушливости климата наблюдается увеличение минерализации грунтовых вод прежде всего за счет роста концентрации гидрокарбонатов и сульфатов кальция и хлоридов натрия.

Наряду с ландшафтными условиями весьма большое влияние на формирование состава грунтовых вод оказывает вещественный состав водовмещающих пород. Так, при углекислотном выветривании малорастворимых пород, например алюмосиликатного состава (к ним относятся магматические породы, многие типы терригенных отложений и др.), в условиях влажного климата формируются низкоминерализованные воды гидрокарбонатного состава. Выщелачивание в тех же условиях известняков и доломитов приводит к образованию вод такого же состава, но с минерализацией на 200...300 мг/л больше.

Выветривание, связанное с окислением сульфидных минералов, которые встречаются как в рассеянном состоянии, так и в виде рудных залежей, обуславливает накопление в водах свободной серной кислоты и сульфатов. Эти процессы подробно рассмотрены в гл. 10. В областях развития гипсоносных отложений содержание сульфатов кальция возрастает до 5 г/л. В районах близповерхностного залегания каменной соли получают развитие высокоминерализованные воды хлоридного натриевого состава.

Таким образом, географическая гидрогеохимическая зональность грунтовых вод, являющаяся прежде всего продуктом ландшафтно-климатической обстановки, в той или иной мере нарушается в районах выхода или близповерхностного залегания хорошо растворимых пород (карбонатных, гипсоносных, соленосных). Отклонения от рассматриваемой зональности грунтовых вод наблюдаются также в долинах крупных рек и на участках разгрузки соленых вод и рассолов, поступающих из нижележащих водоносных горизонтов. В долинах крупных рек возрастает роль дальнепринесенных транзитных вод, сформировавшихся в другой ландшафтной обстановке.

В аридных областях своеобразная гидрогеохимическая зональность может быть связана с формами рельефа. Так, на Прикаспийской равнине

под небольшими понижениями площадью до сотен квадратных метров и глубиной вреза до 1 м, называемыми падинами, через которые осуществляется питание грунтовых вод, наблюдаются относительное опреснение подземных вод и постепенная смена к периферии и с глубиной вод гидрокарбонатного состава на сульфатный и затем хлоридный. Под более глубокими врезами, называемыми сорами, на дне которых осуществляется разгрузка грунтовых вод и их интенсивное испарение, – зональность обратная.

Особая ситуация возникает в районах техногенного загрязнения грунтовых вод, т. е. в районах расположения городских агломераций, горнодобывающих и перерабатывающих, металлургических, химических и других предприятий. Важно отметить, что техногенное загрязнение часто не изменяет химический тип грунтовых вод, или, другими словами, не нарушает природную гидрогеохимическую зональность. Вместе с тем присутствие в водах даже в малых количествах некоторых веществ, например радиоактивных, тяжелых металлов, нефтепродуктов и др., требует выделения особых гидрогеохимических подзон техногенного загрязнения. Это важно для правильной оценки гидрогеохимической обстановки, особенно в практических целях.

**Высотная (горная) гидрогеохимическая зональность.** Высотная гидрогеохимическая зональность проявляется в том случае, когда переход от одной высотной зоны к другой сопровождается сменой ландшафтно-климатической обстановки, что соответственно влечет за собой изменения количества выпадающих осадков, условий питания и движения подземных вод. В работе С.Л. Шварцева [47] на основе многочисленного статистического материала показано, как растет минерализация трещинно-грунтовых вод с понижением отметок рельефа от высокогорных и горно-луговых ландшафтов (96,7 мг/л) к горно-лесным и горно-таежным (327 мг/л) и к горно-степным (776 мг/л). Причем рост минерализации вод обусловлен увеличением концентрации практически всех без исключения компонентов. Чтобы зафиксировать влияние высоты горных сооружений на гидрогеохимическую зональность, необходим ее перепад хотя бы на 300...500 м.

**Вертикальная (геологическая) гидрогеохимическая зональность.**

В настоящее время разработано несколько схем вертикальной (глубинной) зональности подземных вод. Одна из наиболее широко распространенных схем вертикальной гидродинамической зональности подземных вод была разработана Н.К. Игнатовичем, Н.И. Толстихиным, Б.Н. Личковым, Ф.А. Макаренко и др.

Согласно этой схеме, подземные воды разделяются по глубине залегания на три зоны: 1) зону активного водообмена (верхняя зона), воды

которой находятся выше местного базиса эрозии, дренируются реками и подвержены воздействию фильтрующихся сверху поверхностных вод; эта зона более или менее подвержена и воздействию кислорода; 2) зону затрудненного водообмена (средняя зона), которая является промежуточной и в зависимости от местных условий отражает частично свойства верхней и нижней зон; 3) зону относительно застойных вод (нижняя зона), изолированную от воздействия поверхностных вод; смена водных масс осуществляется здесь лишь в течение геологического времени [Справочник по гидрохимии, 1989].

## **4.2. Формирование биогенных веществ**

Согласно [108], к биогенным элементам в природных водах относятся азот, фосфор и кремний в различных соединениях. Они имеют особое значение в развитии жизни в водоемах и водотоках. Азот и фосфор являются обязательными составными частями тканей каждого живого организма. Их роль в природных водах аналогична роли азотных и фосфорных удобрений для сельскохозяйственных культур, без них не могли бы развиваться и водные растения, и животные. В свою очередь концентрации биогенных элементов и их режим целиком зависят от интенсивности биохимических и биологических процессов, происходящих в водных объектах. Выделение этой группы до некоторой степени условно, так как в жизненных процессах, происходящих в природных водах, участвуют и ряд других элементов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  и др.).

Минеральные соединения азота (нитраты, нитриты, аммоний) совершенно необходимы для жизни растений как питательные вещества. Они усваиваются растениями в процессе фотосинтеза и входят в состав их тканей, а если этими растениями питаются животные – то и в состав животных организмов. При интенсивном развитии водных растений минеральный азот может быть полностью извлечен из воды. В этом случае дальнейший рост растений приостанавливается. Обратный переход азота из сложных органических соединений в минеральные формы, называемый процессом регенерации биогенных элементов, может происходить при биохимическом распаде содержащих азот органических соединений.

### **4.2.1. Соединения азота**

Конечным минеральным продуктом сложного процесса распада содержащих азот органических веществ является аммиак, или ионы аммония. Ионы аммония усваиваются растениями при фотосинтезе и мо-

гут быть окислены в нитриты и нитраты. Этот процесс происходит в присутствии кислорода под действием бактерий и имеет две фазы. Первая фаза – переход  $\text{NH}_4^+$  в  $\text{NO}_2^-$  – осуществляется под воздействием бактерий-нитрификаторов. Процесс нитрификации на этом не останавливается; нитритные ионы очень неустойчивы и под воздействием других бактерий окисляются далее в нитратные ионы  $\text{NO}_3^-$  (вторая фаза). Процесс нитрификации может протекать только в аэробных условиях. Возможно, что в поверхностных слоях воды при интенсивном воздействии ультрафиолетовых лучей происходит окисление аммония химическим путем. Не исключена возможность осуществления этой реакции и при каталитическом воздействии ферментов. Нитратные ионы, наряду с некоторыми другими минеральными соединениями, являются конечным продуктом распада органического вещества.

Процессом, направленным на уменьшение содержания в воде связанного азота, является денитрификация, протекающая при недостатке кислорода и наличии безазотистых веществ (крахмал, клетчатка и др.), на окисление которых расходуется кислород нитратов. При этом азот выделяется в свободном состоянии. Процесс денитрификации с точки зрения развития органической жизни нежелателен, так как переводит связанный азот, необходимый для построения белка, в свободное состояние – в атмосферу.

Таким образом, в воде происходит круговорот соединений азота по схеме: растения → животные → продукты распада →  $\text{NH}_4^+$  →  $\text{NO}_2^-$  →  $\text{NO}_3^-$  → растения (рис. 4.1). Кроме того, существует большой круговорот азота на Земле, включающий сушу и атмосферу. Кроме указанных естественных источников минеральных соединений азота в природных водах существует источник, приобретающий все большее значение, – поступление соединений азота с промышленными и особенно хозяйственно-бытовыми сточными водами. Эти соединения являются одним из показателей ухудшающегося санитарного состояния водных ресурсов.

Концентрация аммонийного азота в незагрязненных поверхностных водах обычно составляет сотые доли миллиграмма в  $1 \text{ дм}^3$  и редко повышается до  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ . Повышенная концентрация аммонийного азота возможна только в анаэробных условиях, при которых невозможен процесс нитрификации. Поэтому очень большая его концентрация встречается в подземных водах закрытых структур, связанных с нефтеносными слоями. Для поверхностных вод в условиях существования фотосинтеза в режиме  $\text{NH}_4^+$  наблюдаются закономерные изменения концентрации: уменьшение весной и летом в результате ассимиляции его растениями и увеличение в осенний период при усилении процесса распада накопившегося за лето органического вещества.

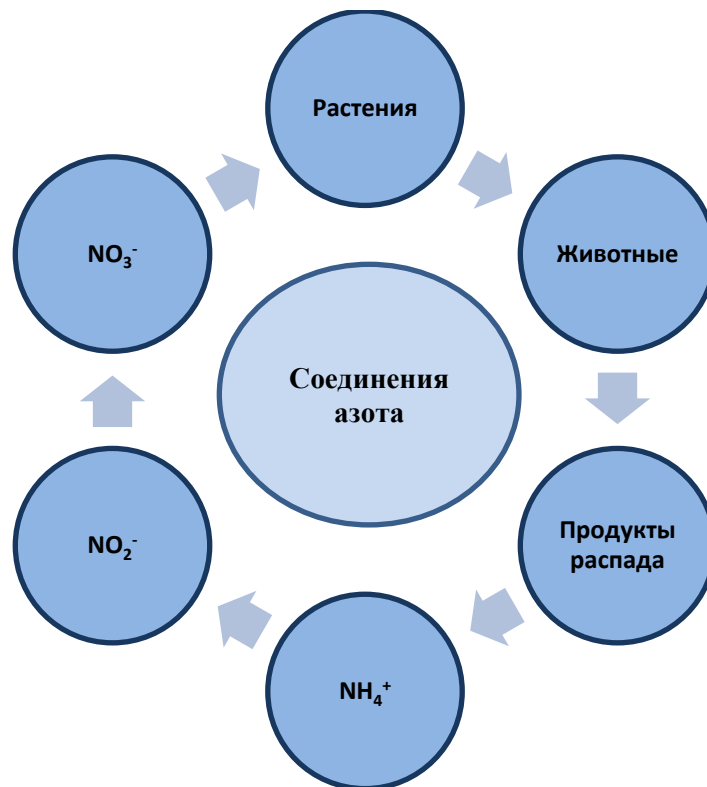


Рис. 4.1. Круговорот соединений азота в воде

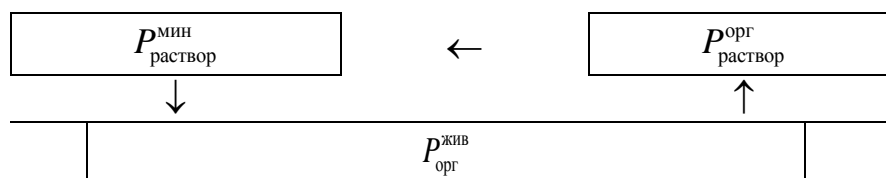
Концентрация нитритов в пересчете на азот в естественных условиях из-за нестойкости очень незначительна. Большую часть года в поверхностных водах нитриты аналитически не обнаруживаются или присутствуют в тысячных долях миллиграмма в 1 дм<sup>3</sup>. Несколько увеличивается их содержание к концу лета, когда усиливается распад органического вещества. В грунтовых водах их содержание несколько выше. Будучи промежуточным нестойким продуктом в процессе нитрификации, нитриты при появлении их в повышенной концентрации указывают на усиленное разложение органических остатков и задержку окисления  $\text{NO}_2^-$  до  $\text{NO}_3^-$ , что говорит о загрязнении водного объекта, т. е. является важным санитарным показателем. Концентрация нитратного азота обычно в пресных поверхностных водах составляет сотые или десятые доли миллиграмма в 1 дм<sup>3</sup>. В грунтовых водах содержание его может быть значительно выше, особенно в районах населенных пунктов.

#### 4.2.2. Соединения фосфора

В природных водах растворенный фосфор присутствует в виде минеральных и органических соединений (органический фосфор), причем последние – и в коллоидном состоянии. Кроме того, фосфор содержится в воде во взвешенных веществах также минерального (апатиты, фосфо-

риты и др.) и органического (остатки организмов) происхождения. Минеральный фосфор находится преимущественно в виде производных ортофосфорной кислоты  $H_3PO_4$ , причём при  $pH > 6,5$  основной формой минерального фосфора является  $HPO_4^{2-}$ . Есть основание считать, что с ростом минерализации фосфаты образуют с кальцием комплексы.

Круговорот фосфора несколько проще, чем азота, и может быть изображен следующей схемой:



Природные соединения органического фосфора поступают в водные объекты в результате процессов жизнедеятельности и посмертного распада водных организмов, обмена с донными отложениями, а соединения минерального фосфора – в результате выветривания и растворения пород, содержащих ортофосфаты (апатиты и фосфориты). Кроме того, органические и минеральные соединения  $P$  попадают в водные объекты со сточными водами и диффузным стоком с поверхности водосбора в виде орто-, мета-, пиро- и полифосфат-ионов (удобрения, синтетические моющие средства, добавки, предупреждающие образование накипи в котлах, и т. п.), при биологической переработке остатков животных и растительных организмов.

Процессом, уменьшающим содержание фосфатов в воде, является потребление их водными растениями, фитопланктоном и фитобентосом. Присутствие фосфатов в еще большей степени необходимо для развития растений: при полном их исчезновении, наблюдаемом при интенсивном фотосинтезе, развитие растений прекращается. Большая часть фосфатов, использованных водными растениями и животными, возвращается обратно в воду в процессе жизнедеятельности организмов или при распаде их остатков, и лишь некоторая часть попадает на дно водных объектов с остатками организмов. Концентрация фосфатов в природных водах очень мала – сотые, реже десятые доли миллиграммов фосфора в  $1 \text{ дм}^3$ , тем не менее значение их для жизни в водоемах и водотоках огромно.

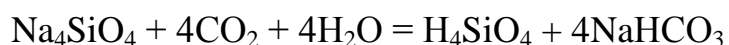
### 4.2.3. Кремний

Кремний является постоянным компонентом химического состава природных вод. Этому способствует повсеместная распространенность, в отличие от других компонентов, соединений кремния в горных поро-

дах, и только малая растворимость последних объясняет малое содержание кремния в воде. Формы соединений, в которых находится кремний в растворе, еще не совсем ясны, они весьма многообразны и меняются в зависимости от минерализации, состава воды и значений рН. Часть кремния находится в истинно растворенном состоянии в виде кремниевой кислоты и поликремниевых кислот. При учете вероятности координации с числом 4 кремниевая кислота имеет, по-видимому, строение ортокремниевой кислоты  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ . При диссоциации она образует ряд производных, из которых значение для природных вод может иметь лишь ион  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ . Вторая ступень диссоциации при существующих в природных водах значениях рН не играет существенной роли. Поликремниевые кислоты имеют переменный состав типа  $m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , где  $m$  и  $n$  – целые числа. Кроме того, кремний содержится в природных водах в виде коллоидов типа  $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ , которые еще мало изучены.

Концентрация кремния в природных водах обычно составляет несколько миллиграммов в  $1 \text{ дм}^3$ . В подземных водах она повышается и часто достигает десятков миллиграммов в  $1 \text{ дм}^3$ , а в горячих термальных водах – даже сотен. На растворимость кремния, кроме температуры, сильно влияет повышение рН раствора.

Сравнительно малое содержание кремния в поверхностных водах, уступающее растворимости диоксида кремния ( $125 \text{ мг/дм}^3$  при  $26^\circ\text{C}$ ,  $170 \text{ мг/дм}^3$  при  $38^\circ\text{C}$ ), указывает на наличие в воде процессов, уменьшающих его концентрацию. К ним надо отнести потребление кремния водными организмами, многие из которых, например диатомовые водоросли, строят свой скелет из кремния. Кроме того, кремниевая кислота как более слабая вытесняется из раствора угольной кислотой:



Способствует неустойчивости кремния в растворе и склонность кремниевой кислоты при определенных условиях переходить в гель. В очень мало минерализованных водах кремний составляет существенную, а иногда и преобладающую часть химического состава воды, несмотря на его малое абсолютное содержание. Преобладает кремний также и в некоторых термальных водах.

Режим кремния в поверхностных водах до некоторой степени сходен с режимом соединений азота и фосфора, однако кремний никогда не лимитирует развитие растительности. Присутствие кремния в воде является серьезной помехой в технике, так как при продолжительном кипячении воды кремний образует в котлах очень твердую силикатную накипь.



### 4.3. Формирование органических веществ

Органическим веществом природных вод называют комплекс истинно растворенных и коллоидных веществ органических соединений. По происхождению органические вещества природных вод могут быть разделены на поступающие извне (с водосборной площади) и образующиеся в самом водном объекте. К первой группе относятся главным образом органические вещества, поступающие с промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами, и гумусовые вещества, вымываемые водой из почв, торфяников, лесного перегноя и других видов природных образований, включающих остатки растений. Из гумусовых веществ для гидрохимии наибольший интерес представляют гуминовые и фульвокислоты.

Гуминовые кислоты представляют собой высокомолекулярные соединения, включающие циклические образования и ряд функциональных групп (фенолгидроксильные, карбоксильные, аминогруппы и др.). Относительная молекулярная масса их, по разным исследованиям, составляет 150...1500, структура еще точно не установлена; все они имеют коллоидные свойства. Фульвокислоты – также высокомолекулярные соединения типа оксикарбоновых кислот, но с меньшим числом углеродных атомов и более выраженными кислотными свойствами. По В.В. Пономаревой, свободная фульвокислота, выделенная диализом из подзолистой почвы, имела рН от 2,6 до 2,8.

Обе эти кислоты характерны для гумуса (гумусовые кислоты), они не содержатся в живых растительных и животных тканях. Соотношение между ними в разных торфах и почвах неодинаково. В черноземных почвах преобладают гуминовые, а в подзолистых – фульвокислоты. Гумусовые кислоты имеют большое значение для формирования химического состава природных вод. Обладая сильной кислотностью, они, наряду с диоксидом углерода, придают воде свойства агрессивности к горным породам и не только к карбонатным, но и к изверженным. Именно с образованием подобных кислот, по Б.Б. Польшову, связывается первичное выветривание изверженных массивных пород. Гумусовые кислоты обладают способностью образовывать комплексные соединения с различными металлами, особенно тяжелыми, которые поэтому и служат одной из главных форм переноса многих микроэлементов природными водами. Органические комплексы, по-видимому, представляют собой наиболее легко усвояемую форму питания растений микроэлементами. Вторая группа органических веществ, т. е. веществ, образующихся в самом водном объекте, обуславливается непрерывно и одновременно протекающими в нем сложнейшими процессами создания первичного органического вещества и его разложения.

Первичное органическое вещество создается синтезирующими растениями и хемосинтетическими бактериями. На основе этого вещества различные организмы, потребляя его как пищу, создают более сложные виды органической материи. Образуется пищевая цепь: растения → растениеядный зоопланктон и зообентос → хищный зоопланктон и зообентос → рыбы → крупные хищные рыбы. В результате в воду поступают как продукты жизнедеятельности всех этих организмов (экскременты, полупереварившаяся пища), так и тела отмерших организмов. Эти остатки частично остаются взвешенными в воде, где поедаются другими организмами или распадаются, а частично опускаются на дно, где подвергаются последующим изменениям.

Все изменения, происходящие с органическим веществом, в основном связаны с жизнедеятельностью бактерий. Микроорганизмы, населяющие воду, превращают сложные органические вещества в более простые: выделяющаяся же при этом энергия служит источником существования микроорганизмов. При этом часть биохимически стойких веществ, которая может очень долгое время существовать в воде, образует так называемый водный гумус, отличный от почвенного, обусловленный по составу пектиново-протеидным комплексом, а также большим количеством гидроксильных групп. Убыль его из водоема связана не столько с химическим и биохимическим воздействием, сколько с адсорбцией взвешенными веществами. Однако большая часть органических веществ нестойкая и в аэробных условиях подвергается распаду до простейших минеральных соединений. Процесс распада заканчивается тогда, когда бактерии уже не могут более использовать присущую органическим веществам аккумулярованную энергию. Распад органического вещества в природных водах имеет важное значение не только для уничтожения остатков организмов и продуктов их жизнедеятельности в водном объекте, но и для возврата (регенерации) в воду ряда элементов (С, N, P и др.), необходимых для питания водных растений.

Рассмотренные два источника появления в воде органического вещества имеют различное значение для природных вод. Для рек, например, основное значение имеют органические вещества, поступающие с водосборной площади, для океана – происходящий в его водной массе круговорот по схеме: растительные и животные организмы ↔ продукты их распада → растения → животные.

Общая концентрация органического вещества в природных водах, изменяясь в широких пределах, бывает наибольшей в болотных водах и реках с болотным питанием, в которых при большой концентрации гумусовых веществ она иногда достигает 50 мг/дм<sup>3</sup> и более, причем вода бывает окрашенной в желтый и коричневый цвет до 300° и выше по

платиново-кобальтовой шкале цветности. Высокая концентрация органического вещества иногда встречается в подземных водах, связанных с нефтеносными месторождениями. Еще большая концентрация может быть в природных водах, загрязненных промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами.

Незагрязненные природные воды обычно содержат мало органических веществ. Например, по Б.А. Скопинцеву, в воде океанов концентрация органического вещества составляет только 2,0...5,4 мг/дм<sup>3</sup> (в среднем 3,0 мг/дм<sup>3</sup>, а в воде рек в среднем 20 мг/дм<sup>3</sup>).

#### 4.4. Формирование микроэлементного состава

К этой группе относятся элементы, соединения которых встречаются в природных водах в очень малых концентрациях, поэтому их называют также микроэлементами, элементами рассеяния, малыми элементами, биоэлементами и т. д. Их концентрация измеряется микрограммами в 1 дм<sup>3</sup> (мкг/дм<sup>3</sup>), а часто имеет и более малые значения.

Микроэлементы представляют собой самую большую группу элементов химического состава природных вод, в нее входят все элементы периодической системы, не включенные в предыдущие четыре группы рассмотренных компонентов. Условно их можно разделить на пять подгрупп: 1) типичные катионы ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Be}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$  и др.); 2) ионы тяжелых металлов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Au}^+$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  и др.); 3) амфотерные комплексообразователи (Cr, Mo, V, Mn); 4) типичные анионы ( $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{B}^{3-}$ ); 5) радиоактивные элементы [1].

Изучение содержания микроэлементов в природных водах непрерывно расширяется в связи с углублением наших знаний об их физиологической роли в жизнедеятельности организмов. Микроэлементы необходимы для нормальной жизнедеятельности растений, животных и человека. Однако при повышенной концентрации многие микроэлементы вредны и даже ядовиты для живых организмов. Поэтому часто они становятся загрязняющими веществами и концентрация их контролируется.

Успешное изучение микроэлементов затруднено не только их малым содержанием в природных водах, но и в сильнейшей мере неясностью формы их присутствия в растворе. Последнее не только осложняет выяснение закономерностей их миграции и режима, но и создает трудности при химическом анализе. Некоторые авторы насчитывают более 20 миграционных форм микроэлементов, в которых они находятся в природных водах.

Если сгруппировать такие сведения в более крупные структуры, то наиболее существенными миграционными формами можно считать сле-

дующие: 1) со взвешенными веществами: в поглощающем комплексе глинистых минералов, в гидроксидной форме и соосажденные с гидроксидами железа и марганца и в виде солей (карбонаты, сульфаты и др.), в комплексных соединениях с органическим веществом, органоминеральных комплексных соединениях, в соединениях с малорастворимыми алюмосиликатными комплексными соединениями; 2) коллоидные растворы, псевдоколлоиды (сорбированные на коллоидах микроэлементы); 3) истинно растворенные соединения: комплексные соединения в виде органических и органоминеральных комплексов, гидроксиды и сорбированные на гидроксидах элементы, ионная форма.

Все эти миграционные формы микроэлементов еще слабо изучены. Наименее изучены подвижные формы микроэлементов во взвешенных веществах, хотя многие тяжелые металлы мигрируют в больших концентрациях именно во взвешенном, а не в растворенном состоянии. Растворенные органические комплексы образуют большинство металлов, прежде всего двух- и трехвалентные металлы с гуминовыми и фульвокислотами. Концентрация закомплексованных металлов определяется прежде всего концентрацией органических кислот. В виде коллоидных соединений присутствуют многие гидроксиды металлов. Возможно, происходит абсорбция органических веществ на поверхности коллоидов, что придает им большую стабильность в растворе.

В зависимости от значений pH и Eh и наличия комплексообразователей один и тот же элемент может присутствовать в разных формах диссоциации и комплексов. Например, при  $\text{pH} \approx 8$  и  $E_h$  200...400 мВ медь может присутствовать одновременно в разных количественных соотношениях в виде недиссоциированных молекул Cu, полудиссоциированных молекул  $[\text{CuCl}]^+$ , продукта гидролиза  $[\text{CuOH}]^+$  и свободного иона  $\text{Cu}^{2+}$ . Вполне вероятны и комплексы с медью, имеющие отрицательный заряд, например  $[\text{CuCl}_3]^-$  и  $[\text{CuCl}_4]^{2-}$ . Кроме того, медь склонна образовывать комплексы с органическими соединениями. Эти разнообразные формы содержания одного и того же металла в воде находятся в таких равновесиях, количественная сторона которых определяется соответствующей константой равновесия, называемой константой нестойкости.

Большинство микроэлементов находится в природных водах в очень низких концентрациях – намного ниже  $1 \text{ мг/дм}^3$ . Для некоторых причиной этого является их малая распространенность в природе (низкий кларк в породах). Однако главными причинами, ограничивающими концентрацию микроэлементов, является ограничение растворимости многих тяжелых металлов (Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Ni, Hg, Ag и др.) постоянно присутствующими в воде анионами  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , реже  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  и  $\text{HS}^-$ .

Особенно большое лимитирующее значение имеют  $\text{OH}^-$ , так как большинство гидроксидов металлов труднорастворимы. Поэтому рН воды является важнейшей характеристикой поведения многих микроэлементов, выпадение в осадок которых происходит при определенных значениях рН. Для некоторых металлов (Ag, Pb) их концентрация ограничивается присутствием  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ , а для  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  – присутствием  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Второй причиной малых концентраций микроэлементов в природных водах является адсорбция. Расчеты показывают, что при малой растворимости соединений с перечисленными анионами концентрация многих микроэлементов в природных водах бывает ниже, чем это возможно для соответствующего произведения растворимости. Сорбентами микроэлементов в природных водах могут быть: а) глинистые минералы во взвешенном состоянии; б) породы, через которые фильтруется вода; в) гидроксид железа (особенно для Mn, Ni, Co); г) органические вещества различной степени дисперсности, являющиеся остатками растительных и животных организмов; д) высокодисперсный оседающий карбонат кальция.

Третьей причиной малых концентраций микроэлементов является извлечение их живыми организмами, для которых они жизненно необходимы. Решающую роль играют, по-видимому, процессы адсорбции минеральными взвешенными веществами, особенно глинистыми, широко распространенными в природных водах.

Таким образом, в природных водах нет условий для создания высоких концентраций микроэлементов. Только в особых условиях (в первую очередь при низких значениях рН) наблюдаются аномально высокие концентрации некоторых микроэлементов.

Большое значение имеют микроэлементы, входящие в группу радиоактивных элементов:

1. Изотопы обычных микроэлементов, встречающихся в природных водах: калия  $^{40}\text{K}$ , рубидия  $^{87}\text{Rb}$ , циркония  $^{95}\text{Zr}$ , индия  $^{115}\text{In}$ , олова  $^{124}\text{Sn}$  и многих других. Распространенность этих изотопов в природе, их долговечность и интенсивность излучений показывают, что практически надо считаться лишь с  $^{40}\text{K}$ . Его концентрация составляет всего 0,012 % общего содержания калия, но активность его излучений  $(11,1...37) \cdot 10^{15}$  Бк/м<sup>3</sup> создает почти весь радиоактивный фон природных вод.

2. Уран и торий, образующие длинные ряды семейства радиоактивных элементов и изотопов самой различной продолжительности жизни – от миллиардов лет до ничтожных долей секунды.

3. Изотопы элементов, возникающих под действием космических лучей:  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{32}\text{Si}$  и др.

Отличительная черта радиоактивных элементов – неустойчивость их ядер, в результате чего происходит их непрерывный распад и образование других элементов или изотопов данного элемента, а также выделение радиоактивных излучений ( $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы,  $\gamma$ -лучи). Поэтому их концентрацию выражают не только в относительных единицах массы (проценты, промилле), но и в единицах радиоактивного излучения – беккерелях.

#### 4.5. Формирование газового состава

В природных водах всегда присутствуют газы в растворенном состоянии. Их качественный и количественный состав зависит от природных условий, в которых находится вода. Происхождение этих газов связано: 1) с составом атмосферы (азот  $N_2$ , кислород  $O_2$ , аргон Ar и другие инертные газы, диоксид углерода  $CO_2$ ); 2) с биохимическими процессами (диоксид углерода, метан  $CH_4$  и тяжелые углеводороды, сероводород  $H_2S$ , азот  $N_2$ , водород  $H_2$ ); 3) с процессами дегазации мантии и метаморфизацией горных пород в глубинных слоях земной коры при высоких значениях температуры и давления (диоксид углерода, оксид углерода CO, сероводород, водород, метан, аммиак  $NH_3$ , хлористый водород HCl и другие соединения водорода с галогенами и бором).

Первая группа газов характерна главным образом для поверхностных и подземных вод, в которые проникают инфильтрационные воды с поверхности, вторая – для поверхностных и подземных вод, третья – в основном для подземных вод. Наиболее широко распространены в поверхностных водах кислород и диоксид углерода, в подземных – сероводород и метан. Прочие газы представляют специальный интерес для проблем геохимии.

Растворимость газов в воде зависит от их химической природы, температуры, давления и минерализации воды. Растворимость некоторых газов, встречающихся в естественных условиях, весьма различная. Характерна большая растворимость в воде диоксида углерода и сероводорода, объясняемая химическим взаимодействием этих газов с водой. Различие в растворимости других газов зависит от изменения их молекул под влиянием силового поля молекул воды. Молекулы газов  $N_2$ ,  $O_2$  и других неполярны, их дипольный момент равен нулю. Однако, когда подобная молекула попадает в силовое поле молекул воды, её электронные оболочки несколько смещаются, центры положительных и отрицательных зарядов перестают совпадать. В результате этого молекулы газа приобретают так называемый индуцированный диполь, который способствует притяжению их молекулами воды. Поэтому индуцированный

дипольный момент газов прямо пропорционален растворимости данного газа в воде.

Растворимость газа в воде обычно падает с повышением температуры, что связано с повышением кинетической энергии молекул газа, способствующей преодолению сил притяжения молекул воды. Процесс растворения газа в воде обратим, т. е. молекулы газа попадают не только из газа в жидкость (абсорбция), но одновременно вырываются из раствора в газовую фазу (десорбция). При равной скорости абсорбции и десорбции наступает равновесие между концентрациями газа в газовой фазе и растворе. Концентрация газа в растворе при наступлении равновесия характеризует растворимость данного газа. Совершенно очевидно, что чем больше молекул газа будет находиться в единице объема газа над жидкостью, т. е. чем больше будет давление газа над жидкостью, тем больше молекул попадет в раствор.

Согласно закону Генри, растворимость газа в жидкости при постоянной температуре прямо пропорциональна давлению, под которым находится жидкость. Эта зависимость растворимости газа в воде от давления хорошо соблюдается при сравнительно малом давлении и для малорастворимых газов и может быть выражена формулой  $C = K \cdot P$ , где  $C$  – растворимость газов в 1 дм<sup>3</sup>;  $P$  – давление данного газа над раствором, Па;  $K$  – коэффициент пропорциональности, выражающий зависимость растворимости газа от температуры при парциальном давлении  $101,3 \cdot 10^3$  Па.

Если над раствором присутствуют и другие газы, то растворимость каждой составной части смеси газов в жидкости, по закону Генри–Дальтона, пропорциональна парциальному (частичному) давлению данной составной части над раствором. Из этого закона следует, что растворимость данного газа не будет меняться от присутствия другого газа и зависит только от давления, которое создает данный газ, находящийся как бы один над раствором.

Процессы растворения и поглощения газов в воде протекают медленно. Для того чтобы содержание растворенного газа в воде пришло в равновесие с его парциальным давлением в атмосфере, требуется определенный, иногда значительный промежуток времени. Наступление равновесия газов может быть ускорено, если раствор будет перемешиваться. Это обстоятельство имеет очень большое значение для растворения газов в воде в естественных условиях.

### 4.5.1. Кислород

Кислород находится в природной воде в виде растворенных молекул. На его содержание в воде влияют две группы противоположно направленных процессов: одни увеличивают концентрацию кислорода, другие уменьшают её. К первой группе процессов, обогащающих воду кислородом, следует отнести: 1) процесс абсорбции кислорода из атмосферы и 2) выделение кислорода водной растительностью в процессе фотосинтеза.

Выделение кислорода в результате фотосинтеза происходит при ассимиляции диоксида углерода водной растительностью (прикрепленной растительностью и фитопланктоном). Процесс фотосинтеза протекает тем сильнее, чем выше температура воды, интенсивность солнечного освещения и больше питательных веществ в воде (P, N и др.); он может происходить не только на самой поверхности водоемов, но в большинстве случаев и на небольшой глубине в зависимости от прозрачности воды. Глубина, на которой фотосинтез наиболее интенсивен, зависит от ряда условий, поэтому для каждого водного объекта и сезона она может быть различной.

Ко второй группе процессов, уменьшающих содержание кислорода в воде, относятся процессы, связанные с потреблением его на окисление органических веществ: биологические (дыхание организмов), биохимические (дыхание бактерий, расход кислорода при разложении органических веществ) и химические (окисление  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и др.). Кроме того, уменьшение содержания кислорода в воде может происходить вследствие выделения его в атмосферу и только в том случае, если вода при данной температуре и давлении окажется пересыщенной кислородом. Очевидно, выделяться из воды кислород может только в поверхностных слоях. Наоборот, потребление кислорода протекает на разной глубине, хотя и с неодинаковой интенсивностью.

Концентрация растворенного кислорода в природных водах колеблется в ограниченных пределах, лимитируемых законом Генри–Дальтона ( $0 \dots 14 \text{ мг/дм}^3$ ) и редко превышает их. Зависимость интенсивности фотосинтеза от освещения и температуры создает в водных объектах периодические сезонные и суточные колебания содержания кислорода. Амплитуда этих колебаний может быть значительной и зависит от соотношения интенсивности процессов, определяющих продукцию кислорода (ассимиляционная деятельность – фотосинтез организмов), и его потребления. Так как при суточном ходе потребление кислорода сравнительно мало зависит от суточных изменений солнечной радиации, а фотосинтез всецело определяется ею, то в течение дня происходит накопление кислорода, а в темное время суток – только его расхо-



дование. Вследствие зависимости концентрации кислорода в поверхностных водах от целого ряда факторов его концентрация значительно меняется в течение суток, сезона и года.

#### 4.5.2. Диоксид углерода

Диоксид углерода находится в воде главным образом в виде растворенных молекул газа  $\text{CO}_2$ . Однако часть их (около 1 %) вступает во взаимодействие с водой, образуя угольную кислоту:



Обычно же не разделяют  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{CO}_3$  и под диоксидом углерода подразумевают их сумму ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3$ ).

В природных водах источником диоксида углерода являются прежде всего процессы окисления органических веществ, происходящие с выделением  $\text{CO}_2$  как непосредственно в воде, так и в почвах и илах, с которыми соприкасается вода. К ним относятся дыхание водных организмов и различные воды биохимического распада и окисления органических остатков. В некоторых подземных водах важным источником диоксида углерода являются вулканические газы, выделяемые из недр земли, происхождение которых связано с дегазацией мантии и со сложными процессами метаморфизации осадочных пород, протекающими в глубинах под влиянием высокой температуры. Обычно эти подземные воды относятся к областям интенсивной тектонической деятельности и проявления вулканизма в недалеком прошлом. Поэтому часто в подземных водах и источниках глубинного происхождения наблюдается высокое содержание диоксида углерода. Поглощение водой диоксида углерода из атмосферы, в отличие от кислорода, имеет важное значение для воды морей и океана и меньшее – для вод суши.

Уменьшение содержания диоксида углерода прежде всего происходит при фотосинтезе. При очень интенсивном фотосинтезе, когда отмечается полное потребление газообразного  $\text{CO}_2$ , последний может быть выделен из ионов  $\text{HCO}_3^-$ :



Диоксид углерода расходуется также на растворение карбонатов и химическое выветривание алюмосиликатов.



Уменьшение содержания  $\text{CO}_2$  в воде, особенно в поверхностных водах суши, происходит также при выделении его в атмосферу. Вообще  $\text{CO}_2$  атмосферы имеет большое значение для  $\text{CO}_2$ , содержащегося в поверхностных водах, регулируя его содержание там.

Между  $\text{CO}_2$  атмосферы и  $\text{CO}_2$  поверхностных вод существует непрерывный обмен, направленный на установление между ними равновесия, согласно закону Генри–Дальтона. В том случае, если парциальное давление  $\text{CO}_2$ , растворенного в воде ( $p\text{CO}_2$  воды), выше, чем парциальное давление  $\text{CO}_2$  в атмосфере ( $p\text{CO}_2$  атм), то диоксид углерода выделяется в атмосферу; при обратном соотношении ( $p\text{CO}_2$  воды <  $p\text{CO}_2$  атм) происходит поглощение диоксида углерода водой из атмосферы.

Поскольку парциальное давление диоксида углерода в атмосфере очень невелико (33 Па), то, несмотря на большую растворимость его (при давлении 1013 гПа и температуре 12 °С до 2166 мг/дм<sup>3</sup>), равновесие между водой и атмосферой достигается при очень малом содержании  $\text{CO}_2$  в воде. При парциальном давлении  $\text{CO}_2$  в атмосфере 33 Па растворимость его в воде будет  $2166 \cdot 0,00033 = 0,715$  мг/дм<sup>3</sup> (при 12 °С). Обычно же поверхностные воды суши, в которых протекают различные процессы разложения органического вещества и которые связаны с почвами, имеют большее содержание  $\text{CO}_2$  и поэтому выделяют его в атмосферу. Лишь при очень сильном фотосинтезе, когда  $\text{CO}_2$  практически исчезает, может происходить поглощение  $\text{CO}_2$  из атмосферы.

Содержание диоксида углерода в природных водах чрезвычайно разнообразно – от нескольких десятых долей до 3...4 тыс. мг/дм<sup>3</sup>. Наименьшая концентрация  $\text{CO}_2$  наблюдается в поверхностных водах, особенно минерализованных (моря, соленые озера), наибольшая – в подземных и загрязненных сточных водах. В реках и озерах концентрация  $\text{CO}_2$  редко превышает 20...30 мг/дм<sup>3</sup>.

### **4.5.3. Прочие газы**

Наиболее постоянный газ в природных водах – растворенный молекулярный азот  $\text{N}_2$ . В высшей степени химически устойчивый и биологически трудно усвояемый азот, при занесении в глубинные слои океана или подземные воды, меняется главным образом лишь под влиянием физических условий (температура и давление). Значительно большее практическое значение имеет растворенный сероводород  $\text{H}_2\text{S}$ , присутствие которого в природных незагрязненных водах – сравнительно редкое, но характерное для условий нарушенного обмена вод с атмосферой явление.

При парциальном давлении сероводорода в атмосфере, равном нулю, длительное присутствие его в поверхностных водах невозможно. Кроме того, он легко окисляется кислородом, растворенным в воде. Поэтому в воде рек и озер сероводород наблюдается лишь иногда в придонных слоях, главным образом в зимний период, когда затруднена

аэрация водных масс. Сероводород встречается также в некоторых придонных морских и океанических водах в условиях затрудненной вертикальной циркуляции (фиорды Норвегии, Аравийское море). Гораздо чаще сероводород присутствует в подземных водах, изолированных от поверхности, и в сильно загрязненных поверхностных водах, в которых он служит показателем сильного загрязнения и анаэробных условий.

Из прочих газов следует отметить также метан  $\text{CH}_4$  и тяжелые углеводороды, нередко встречающиеся в значительных концентрациях под большим давлением в глубинных подземных водах закрытых структур, связанных с нефтеносными месторождениями. В небольшой концентрации метан наблюдается в придонных слоях озер, где он выделяется из ила при разложении растительных остатков, а также в океанических донных отложениях в районах высокой биологической продуктивности.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Как формируется ионный состав атмосферных вод? Какие существуют пространственно-временные закономерности его изменения?
2. Как формируется ионный состав речных вод? Какие существуют пространственно-временные закономерности его изменения?
3. Как формируется ионный состав озёрных вод? Какие существуют пространственно-временные закономерности его изменения?
4. Как формируется ионный состав подземных вод зоны гипергенеза? Какие существуют пространственно-временные закономерности его изменения?
5. Что такое генетические циклы, природные обстановки и типы подземных вод?
6. В чем заключается широтная и вертикальная (высотная и геологическая) зональность изменения химического состава подземных вод?
7. Как формируются содержания биогенных веществ в природных водах?
8. Как формируется содержание органических веществ в природных водах?
9. Как формируется содержание микроэлементного состава природных вод?
10. Как формируется содержание газового состава природных вод?

## **5. МЕТОДИКА ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Гидрохимические исследования (геохимические исследования водных объектов) являются составной частью геологоразведочных работ, инженерно-экологических изысканий и экологического мониторинга компонентов окружающей среды. Они направлены на изучение закономерностей распределения химических элементов в водных объектах и атмосфере с целью выделения фоновых и аномальных участков. При этом попутно решается целый ряд других задач.

В составе гидрохимических исследований можно выделить четыре основных этапа: 1) проектирование и подготовительные работы; 2) полевые работы; 3) аналитические работы; 4) камеральные работы.

Качество результатов исследований достигается высоким профессиональным уровнем персонала, использованием совершенных и унифицированных методов анализа и лабораторного оборудования, представительностью проб, междулабораторным и внутрилабораторным контролем. С учётом указанных этапов в структуре главы также выделены соответствующие разделы.

### **5.1. Проектирование и подготовительные работы**

#### ***5.1.1. Общая структура подготовительного этапа***

За время подготовительных работ, предшествующих гидрохимическим исследованиям, проводятся: 1) сбор и систематизация исходной информации; 2) анализ полноты и качества экологической и геохимической изученности территорий; 3) многофакторное районирование; 4) комплектация необходимого районирования и снаряжения.

Сбору и систематизации подлежат следующие материалы: 1) геологические, гидрогеологические, геофизические, минерагенические карты и карты полезных ископаемых; 2) геоморфологические, почвенные, четвертичных отложений и неотектонические карты; 3) экономико-географические и экологические карты, содержащие данные о расположении и характере источников загрязнения; 4) данные ранее проведенных геохимических работ; 5) данные дистанционного изучения территории. Территория проведения исследований должна быть обеспечена топографическими картами и аэрокосмическими снимками среднего и крупного масштабов в необходимом количестве.

На основании анализа собранных материалов корректируются или вновь составляются следующие цифровые модели вспомогательных карт: 1) геологических комплексов; 2) ландшафтов; 3) функционального

зонирования; 4) геохимической изученности; 5) схема планируемого пробоотбора.

Анализ геохимической изученности исследуемой территории включает: 1) установление полноты геохимической изученности в принятом масштабе; 2) оценку эффективности примененных методов; 3) оценку степени сохранности ведомостей аналитических данных с привязками; 4) определение качества, информативности и пригодности аналитических данных проведенных ранее геохимических исследований, перечня проанализированных элементов в соответствии с решаемыми задачами; 5) оценку пригодности имеющегося картографического материала для решения поставленных задач; 6) определение степени сохранности дубликатов геохимических проб и (или) керна скважин.

Гидрохимическую и эколого-геохимическую изученность территории можно считать удовлетворительной при соблюдении следующих условий: 1) проведены геохимические съемки крупного и среднего масштабов; 2) примененные геохимические методы эффективны с учетом конкретных ландшафтно-геологических условий и комплекса поставленных задач на изучаемой территории; 3) имеются в наличии полные аналитические данные с привязками проб к картам физического материала геохимического опробования или поэлементные карты-разnosки; 4) перечень изученных химических элементов и их соединений включает основные элементы – индикаторы полезных ископаемых исследуемой территории, основные токсичные и биофильные элементы и соединения; 5) результаты примененных методов анализа позволяют получить не менее трех значимых цифр на каждый порядок содержаний химических элементов; 6) чувствительность анализа (нижний предел обнаружения) позволяет получить не менее 15 % значимых величин содержаний изученных химических элементов; 7) метрологические показатели результатов контрольных анализов соответствуют нормативным требованиям.

Результаты анализа гидрохимической и эколого-геохимической изученности могут быть отображены на соответствующей карте, где выделяются площади: 1) изученные хорошо (полностью); 2) изученные удовлетворительно или частично; 3) изученные неудовлетворительно или неизученные.

Для планирования видов и объемов геохимического опробования, определения мест пробоотбора, обеспечивающих его репрезентативность, проводится многофакторное районирование территории и составление на его основе карты (схемы) планируемого пробоотбора. Многофакторное районирование проводится путем использования карт геологических комплексов, ландшафтного и функционального зониро-

вания и направлено на выявление квазиоднородных участков, которые в ряде случаев можно считать внутренне однородными по ландшафтно-геохимическим, геологическим, минерагеническим условиям, а также по характеру хозяйственного использования. Размер такого участка, как правило, должен быть не менее 4 км<sup>2</sup>. Исключение могут составлять участки, имеющие особо важное значение для ресурсно-экологической оценки территории.

На карте-схеме планируемого пробоотбора отображаются: 1) площади, по которым имеются аналитические данные удовлетворительного качества; 2) площади, по которым нет аналитических данных, но можно отобрать и проанализировать материалы из имеющихся дубликатов ранее отобранных проб и керна скважин; 3) площади, которые необходимо опробовать в планируемый период полевых работ.

При составлении схемы планируемого пробоотбора следует исходить из следующего: 1) плотность опробования должна составлять в среднем 1 точку на 4 км<sup>2</sup> территории по каждому из выбранных компонентов (с учетом имеющихся дубликатов проб); 2) виды опробования выбираются как минимально необходимые, исходя из конкретных решаемых задач и реальных природных условий; 3) опробование должно проектироваться как сопряженное по нескольким компонентам ПГС.

### ***5.1.2. Общая структура проекта гидрохимических исследований***

На основе информации, полученной в результате подготовительных работ, готовится проект, либо расширенное геологическое задание, либо программы исследований. В этом документе (далее – проекте):

- 1) обозначаются границы исследуемой территории;
- 2) описываются ландшафтные, геологические, металлогенические, гидрогеологические, хозяйственные условия территории;
- 3) анализируется степень, характер, качество предшествующего геохимического изучения;
- 4) конкретизируется целевое назначение и основные задачи исследований в соответствии с геологическими, минерагеническими и хозяйственными условиями региона;
- 5) обосновываются виды, объемы геохимического опробования и расположение пунктов опробования с учетом всей информации, полученной в результате подготовительных работ;
- 6) предусматривается метрологическое обеспечение проектируемых работ;
- 7) обосновывается организация работ и этапы их выполнения;

8) перечисляются состав и виды конечной продукции.

К проекту исследований, как правило, прилагаются: 1) обзорная административная карта региона работ; 2) карта геологических комплексов; 3) ландшафтная карта; 4) карта функционального зонирования; 5) карта геохимической изученности; 6) карта-схема планируемого пробоотбора; 7) дополнительные материалы.

## 5.2. Полевые работы

Полевые работы проводятся с целью получения фактических данных для решения задач. Гидрохимические исследования (как часть эколого-геохимических исследований) осуществляются путем площадного и (или) линейного сопряженного геохимического опробования компонентов природной среды, сопровождаемого необходимой документацией. Продолжительность, содержание и организация полевых работ определяются результатами подготовительного этапа. В состав полевых работ входит: 1) геолого-, ландшафтно- и эколого-геохимическое изучение площади работ с геохимическим опробованием выбранных компонентов природной среды в соответствии с проектом; 2) ведение необходимой первичной документации; 3) полевая камеральная обработка материалов; 4) контроль качества полевых работ.

Картографической основой полевых работ является карта-схема расположения пунктов отбора проб, составленная в подготовительный период. Для уточнения составленных в подготовительный период ландшафтных и функционального зонирования карт проводятся дополнительные ревизионные маршруты и изучение заранее выбранных опорных площадок. В процессе этих работ изучается ландшафтная обстановка, характер и степень ее антропогенного изменения, типы почв, структура рыхлого покрова, уточняется характеристика водопунктов, устанавливаются закономерности распространения отдельных компонентов ландшафтов, корреляционные связи между ними и уточняются границы ландшафтов. При необходимости на опорных участках проводится специальное опробование, нацеленное на выяснение особенностей распределения химических элементов в природных телах ландшафта, выяснение факторов, контролирующих распределение элементов, уточнение критериев интерпретации и оценки геохимических полей.

Количество и виды опробуемых компонентов природной среды выбираются в соответствии с проектом в зависимости от конкретных решаемых задач, реальной ландшафтно-геологической обстановки и хозяйственного использования территории. Плотность сопряженного опробования при площадных исследованиях, как правило, должна быть

не менее, чем один пункт пробоотбора (в среднем) по каждому из опробуемых компонентов природной среды на 4 км<sup>2</sup> рассматриваемой территории. Допускается сгущение или, наоборот, разряжение плотности опробования в зависимости от природных условий и техногенной нагрузки. При этом отбираемое количество проб по каждому компоненту природной среды должно обеспечивать представительность оценок и выводов по всем решаемым задачам.

Привязка пункта пробоотбора не должна допускать неопределенности. Все точки геохимического опробования привязываются в географических координатах и выносятся на топопланшет и аэрофотоснимок. Каждой пробе присваивается индивидуальный номер из буквенных и цифровых индексов, обозначающих порядковые номера пункта пробоотбора, материал пробы (компонент природной среды), название исследуемой территории. Опробование на точке сопровождается документацией, включающей описание ландшафтной, геологической, гидрогеологической обстановки на опробуемой площадке, а также характера и степени их изменения природными и антропогенными процессами.

### ***5.2.1. Опробование вод поверхностных и подземных водных объектов***

Программа отбора проб воды должна быть составлена в соответствии с целью последующего определения химического состава и физических свойств воды и предусматривать: перечень определяемых компонентов; требования к месту отбора проб; периодичность и частоту отбора проб, а также, при необходимости, статистическую обработку данных по отбору проб с целью выявления оптимальных величин периодичности и частоты отбора проб. Место, периодичность и частоту отбора проб устанавливают в соответствии с требованиями ГОСТ 2761–84, ГОСТ 17.1.3.07–82\*, ГОСТ 17.1.3.08–82, ГОСТ 17.1.5.02–80, ГОСТ 17.1.5.05–85.

В общем случае целью отбора проб является получение дискретной пробы, отражающей качество исследуемой воды. Отбор проб проводят для следующих целей: 1) исследования качества воды для принятия корректирующих мер при обнаружении изменений кратковременного характера; 2) исследования качества воды для установления программы исследований или обнаружения изменений долгосрочного характера; 3) определения состава и свойств воды по показателям, регламентированным в нормативных документах (НД); 4) идентификации источников загрязнения водного объекта. В зависимости от цели и объекта исследования разрабатывают программу исследований и, при необходимости, проводят статистическую обработку данных по отбору проб. Состав и



содержание программы в зависимости от исследуемого объекта – по ГОСТ 17.1.5.05–85, ГОСТ 17.1.3.08–82 и НД Росгидромета. Место отбора проб и периодичность отбора устанавливаются в соответствии с программой исследования в зависимости от водного объекта.

Согласно НД Росгидромета в зависимости от задач исследований могут быть отобраны **простые** (точечные, единичные, разовые) и **смешанные** (объединенные, составные, средние) пробы.

**Простая проба** характеризует состав исследуемого объекта в данное время в данном месте. Ее получают однократным отбором требуемого количества вещества. Простые пробы используют в тех случаях, когда исследуемый объект неоднороден, значения параметров непостоянны и применение смешанной пробы скрадывает различия между отдельными пробами вследствие реакций веществ друг с другом. Простые пробы необходимы для определения содержания нестойких компонентов (растворенные газы, растворенные сульфиды и т. д.).

**Смешанная проба** характеризует средний состав исследуемого объекта за определенный промежуток времени в определенном объеме. Ее получают смешиванием простых проб, взятых одновременно в различных местах исследуемого объекта (усреднение по объему) или в одном и том же месте через определенные промежутки времени (усреднение по времени). В случае необходимости можно отобрать пробу, усредненную по месту и времени. Смешанную пробу воды обычно получают смешиванием равных объемов проб, отобранных через равные промежутки времени. Этот способ пригоден только в том случае, если все точки исследуемого водного объекта равноценны или если в месте отбора проб постоянный расход воды. Если это условие не выполняется, то готовят среднюю пропорциональную пробу из различных объемов проб, взятых через равные интервалы времени, или из равных объемов проб, взятых через различные интервалы времени таким образом, чтобы объем или число проб соответствовали расходу воды в данном месте. Смешанная проба тем точнее, чем меньше интервалы между отдельно взятыми составляющими ее пробами; наилучший результат можно получить при автоматизированном непрерывном отборе проб. Смешанную пробу не рекомендуется отбирать за период более суток. При необходимости длительного хранения пробу следует консервировать. Смешанную пробу не следует применять для определения компонентов и характеристик воды, легко подвергающихся изменениям (растворенные газы, рН и т. д.). Их определяют в каждой отдельной точке исследования. Смешанную пробу нельзя составлять и в том случае, если состав воды изменяется во времени.

Объем отбираемой пробы зависит от вида и числа определяемых компонентов, их концентрации в исследуемом объекте, применяемого метода определения (в руководящем документе, регламентирующем методику определения компонента, указывается объем воды, требуемый для проведения определения.) Для поверхностных вод этот объем обычно составляет от 1 до 5 л.

В зависимости от времени отбор проб может быть периодическим, регулярным, нерегулярным (**виды пробоотбора**). При **периодическом отборе** пробы отбирают в определенные промежутки времени (с использованием хронометра). **Регулярный отбор** проб проводят с целью получения информации о пространственно-временных характеристиках состава и свойств воды. Регулярный отбор проб на водных объектах, как правило, проводят в основные фазы водного режима не менее 7 раз в год: во время половодья – на подъеме, пике и спаде половодья; во время летней межени – при наименьшем расходе и при прохождении дождевого паводка; осенью – перед ледоставом и во время зимней межени. **Нерегулярный отбор** проб проводят при необходимости определения возможных или ожидаемых изменений характеристик состава и свойств воды (при аварийных ситуациях, залповых выбросах загрязняющих веществ и т. д.).

Пробы воды должны быть подвергнуты исследованию в течение установленных в ГОСТ Р 51592–2000 сроков с соблюдением условий хранения. Выбранный метод подготовки отобранных проб к хранению должен быть совместим с методом определения конкретного показателя, установленного в НД. При этом если в НД на метод определения указаны условия хранения проб, то соблюдают условия хранения проб, регламентированные в НД. О длительности хранения пробы воды делают отметку в протоколе испытаний. При нарушении условий транспортирования или хранения исследование пробы проводить не рекомендуется. Все процедуры отбора проб должны быть строго документированы. Записи должны быть четкими, осуществлены надежным способом, позволяющим провести идентификацию пробы в лаборатории без затруднений.

Критериями для выбора емкости, используемой для отбора и хранения проб, являются: 1) предохранение состава пробы от потерь определяемых показателей или от загрязнения другими веществами; 2) устойчивость к экстремальным температурам и разрушению; способность легко и плотно закрываться; необходимые размеры, форма, масса; пригодность к повторному использованию; 3) светопроницаемость; 4) химическая (биологическая) инертность материала, использованного для изготовления емкости и ее пробки (например, емкости из боросили-

катного или известково-натриевого стекла могут увеличить содержание в пробе кремния или натрия); 5) возможность проведения очистки и обработки стенок, устранения поверхностного загрязнения тяжелыми металлами и радионуклидами. Допускается применение одноразовых емкостей для отбора проб. Для отбора твердых и полужидких проб используют кружки или бутылки с широким горлом.

Емкости для проб на *паразитологические* показатели должны быть оснащены плотно закрывающимися пробками. Не допускается отбор проб в открытые емкости типа ведра. Емкости с закручивающимися крышками, узким и широким горлом должны быть снабжены инертными пластмассовыми (например, из политетрафторэтилена) или стеклянными пробками. Не допускается применять резиновые прокладки и смазку, если емкость предназначена для отбора проб с целью определения органических и микробиологических показателей.

Для хранения проб, содержащих светочувствительные ингредиенты (включая морские водоросли), применяют емкости из светонепроницаемого или неактиничного стекла с последующим размещением их в светонепроницаемую тару на весь период хранения пробы.

Емкости для проб, предназначенных для определения *микробиологических показателей*, должны:

- 1) выдерживать высокие температуры при стерилизации (в том числе пробки и защитные колпачки);
- 2) предохранять от внесения загрязнений;
- 3) изготавливаться из материалов, не влияющих на жизнедеятельность микроорганизмов;
- 4) иметь плотно закрывающиеся пробки (силиконовые или из других материалов) и защитные колпачки (из алюминиевой фольги, плотной бумаги).

Основное условие при отборе проб на микробиологический анализ – соблюдение стерильности. Пробы воды отбирают только в стерильные бутылки, которые открывают и закрывают под водой, держа пробку за верхний конец. В бутылку не должны попадать вода, стекающая с рук, куски почвы, пыль и окружающий воздух.

Усредненную пробу протекающей реки берут в местах наиболее сильного течения, лучше в фарватере течения. Если цель исследования не указана, рекомендуется избегать отбора проб стоячей воды перед плотинами, в изгибах, глухих рукавах и т. д. Фарватера можно достигнуть на лодке, с моста или же с обрывистого берега на излучине, где фарватер прижат к берегу. Пробу берут под поверхностью воды, лучше в верхней трети общей глубины (обычно 20...30 см под поверхностью).

Если требуется отразить в пробе результаты смешения двух потоков или речной воды со сточными водами, то пробу следует отбирать в месте полного смешения, определить которое довольно трудно. Надо иметь в виду, что смешение вод различной плотности и различной температуры происходит очень медленно. Это зависит от скорости течения, рельефа русла, количества изгибов, и т. д. Обычно полное смешение происходит на расстоянии нескольких метров или нескольких километров от места слияния потоков. В свою очередь место отбора пробы не должно быть слишком удаленным от места слияния, так как важно учитывать изменение качества во времени. Следует учитывать и то, что между местом слияния потоков и пунктом полного смешения могут оказаться плотины, притоки и другие сбросы сточных вод. Необходим также легкий доступ к месту взятия пробы в течение всего года. Выбранное место не рекомендуется менять, если оно удовлетворяет необходимым условиям.

Для специальных исследований иногда требуется установить различие в качестве проб, взятых из разных мест поперечного сечения ручья. В этом случае выбирают несколько вертикалей, по которым отбирают пробы с различных глубин данного створа. Такой отбор обычно сопровождается измерением скорости течения в отдельных местах взятия проб.

Перед плотиной, а также непосредственно за плотиной пробы отбирать не следует, так как такие пробы неточно отражают содержание в воде растворенных газов и некоторых других компонентов.

Каждый отбор пробы воды из потока должен быть дополнен измерением расхода по соответствующему профилю в данный момент. Поэтому целесообразно выбирать места для отбора проб, расположенные вблизи гидрометеорологического поста или водомерной рейки.

Прежде чем взять пробу, посуду следует ополоснуть несколько раз водой, подлежащей отбору. Бутыли, наполненные пробой, нужно надписать или пронумеровать, чтобы не перепутать пробы. Лучше надписи делать нестирающейся краской. Номера надо записывать в дневник.

Для отбора бактериологических проб из скважин, шурфов и других горных выработок рекомендуется пользоваться бактериологическими батометрами системы Г.А. Могилевского, З.И. Кузнецовой [12]. Скважины для взятия микробиологических проб воды подготавливают также, как и для взятия проб на химический анализ, а именно: при самоизливе скважин обеспечивают отбор проб после максимального промыва скважины и установления постоянства состава воды, что может быть достигнуто в результате длительного самоизлива при обязательной

смене 2...3 объемов воды; для скважин, где статический уровень находится ниже поверхности земли, пробы отбирают после установления постоянства химического состава и последующей смены также не менее 2...3 объемов воды в скважине.

Буылки для отбора микробиологических проб тщательно моют горячей водой, высушивают, закрывают ватными пробками и стерилизуют в сушильном шкафу при 160...170 °С в течение 2 ч (так же стерилизуют всю химическую посуду, используемую при микробиологических посевах). После стерилизации ватные пробки заменяют над горелкой стерильными (прокипяченными в воде) резиновыми пробками, после чего горлышки бутылок закрывают колпачками (можно из кальки), которые завязывают шпагатом.

После отбора пробы на бутылку наклеивают или привязывают к её горлышку этикетку с указанием данных: а) год, месяц, число отбора пробы; б) местонахождение объекта опробования; в) проба №, источник, скважина; г) условия отбора пробы (при откачке или самоизливе); д) интервал опробования; е) температура воды; ж) рН воды; з) кем отобрана проба.

Бактериологические пробы в течение 1–2 недель должны быть отправлены на место их анализа. Перед отправкой пробы необходимо поместить в прохладное место. Их нельзя держать на солнце, так как его лучи убивают бактерии.

**Требования к пробоотборникам.** Пробоотборники должны: 1) минимизировать время контакта между пробой и пробоотборником; 2) изготавливаться из материалов, не загрязняющих пробу; 3) иметь гладкие поверхности; 4) быть сконструированы и изготовлены применительно к пробе воды для соответствующего анализа (химический, биологический или микробиологический).

Оборудование переносного пробоотборника должно быть легким, защищенным от воздействия атмосферных явлений и приспособленным к работе в широком диапазоне условий окружающей среды.

Пробы отбирают вручную специальными приспособлениями или с применением автоматизированного оборудования.

При разработке и выборе автоматизированного оборудования для отбора проб воды обращают внимание на следующие основные факторы с учетом программы отбора проб: 1) прочность конструкции; 2) устойчивость к коррозии и биоповреждениям в воде; 3) простота эксплуатации и управления; 4) возможность самопроизвольной очистки от засорения твердыми частицами; 5) возможность измерения отобранного объема пробы; 6) обеспечение корреляции аналитических данных с пробами, отобранными вручную; 7) емкости для проб должны легко

выниматься, очищаться и собираться; 8) обеспечение минимального объема пробы 0,5 дм<sup>3</sup>; 9) обеспечение хранения пробы в темноте и хранения температуро- и времязависящих проб при температуре 4 °С на период не менее 24 ч при температуре окружающей среды до 40 °С; 10) регулировка, при необходимости, скорости жидкости для предотвращения разделения фаз; 11) наличие выпускного устройства с минимальным внутренним диаметром 12 мм и установленной заслонкой по потоку для предотвращения загрязнения и накопления твердых частиц; 12) возможность повторных поступлений проб в отдельные емкости для отбора проб; 13) защита конструкции пробоотборника от избыточной влажности (атмосферной и испарений исследуемой воды) и от обледенения в холодный период года.

**Устройства для отбора проб поверхностных вод.** На практике при отборе пробы с поверхности водоема или водотока чаще всего используют стеклянную (полиэтиленовую) бутылку или эмалированное ведро. При отборе проб воды с определенной глубины используют специальные пробоотборные устройства различных конструкций. Основной их частью является цилиндрический сосуд (пластмассовый, металлический), открытый с обеих сторон и снабженный плотно прилегающими крышками, закрывающимися при помощи пружины фиксированными спусковыми устройствами. Спусковые устройства приводятся в действие при помощи вспомогательного тросика или посредством удара груза, опускаемого по подвесному тросику. Сосуд с крышками, зафиксированными в открытом положении, погружают в воду до требуемой глубины. После достижения требуемой глубины при помощи спускового устройства закрывают крышки и сосуд поднимают на поверхность. Пробу выливают в бутылку через выпускной кран. Пробоотборник можно снабдить термометром для одновременного измерения температуры. Наиболее распространены пробоотборники (батометры): 1) вакуумный ГР-61, глубина погружения до 20 м, объем выбираемой воды 3 л; 2) бутылка в грузе ГР-15 м, глубина погружения 1...5 м, объем 1 л; 3) бутылка на штанге ГР-16 м, глубина погружения до 3 м, объем 1 л; 4) Молчанова ГР-18, глубина погружения до 40 м, объем 4 л, измерение температуры 6...41 °С; 5) морской БМ-48, глубина погружения зависит от используемой лебедки, объем 5...10 л.

**Подготовка проб к хранению.** Для подготовки отобранной пробы к хранению в зависимости от определяемого показателя проводят при необходимости: 1) фильтрацию (центрифугирование); 2) консервацию; 3) охлаждение (замораживание).

**Фильтрация (центрифугирование) проб.** Взвешенные вещества, осадки, морские водоросли и микроорганизмы удаляют при взятии

пробы или тотчас после этого фильтрованием проб через фильтровальную бумагу или мембранный фильтр, или центрифугированием. Фильтрование применяют также для разделения растворимых и нерастворимых форм, подлежащих определению. Фильтрование не применяют, если фильтр задерживает один или более ингредиентов, подлежащих определению. Фильтр должен быть тщательно промыт перед применением, а при необходимости стерилизован, быть совместимым с методом определения показателя и не должен вносить дополнительных загрязнений.

**Охлаждение (замораживание) проб.** Пробу охлаждают (замораживают) сразу после отбора. После охлаждения (замораживания) емкости с пробами размещают и транспортируют в охлаждающих ящиках или рефрижераторах. Охлаждение проводят в тающем льде или в рефрижераторе до температуры 2...5 °С с последующим размещением пробы в темном месте. Замораживание до температуры минус 20 °С применяют с целью увеличения продолжительности хранения пробы. При этом контролируют способ замораживания и оттаивания пробы для возврата ее к исходному состоянию после оттаивания. При замораживании проб применяют емкости из полимерных материалов (например, из поливинилхлорида). Пробы, предназначенные для микробиологических анализов и определения летучих органических веществ, замораживанию не подлежат.

**Консервация проб.** Для консервации проб применяют: 1) кислоты; 2) щелочные растворы; 3) органические растворители; 4) биоциды; 5) специальные реактивы для определения некоторых показателей (например, кислорода, цианидов, сульфидов). При этом не допускается применять для консервации: 1) хлорид ртути и фенилацетат ртути; 2) консерванты, содержащие вещества (ионы, элементы), подлежащие определению в отобранной пробе. При консервации используемое вещество добавляют непосредственно в пробу после ее отбора или в пустую емкость до отбора проб. Добавление консервантов учитывают при определении показателя и при обработке результатов определений. Следует также отметить, что для консервации проб предпочтительно применять концентрированные растворы консервантов с целью использования их в малых объемах. Если при добавлении консерванта изменение объема пробы не превышает 5 %, то при определениях можно пренебречь соответствующим разведением. Консерванты предварительно испытывают на возможность дополнительного внесения ими загрязнений и сохраняют их в достаточном количестве для проведения контрольных испытаний. Предельная концентрация вносимых с консервантами загрязнений определяется требованиями методики определения соответствующих показателей.

В связи со спецификой методов анализа вод, позволяющей определять группы их компонентов, пробу целесообразно на точке отбора помещать в заранее подготовленную чистую посуду без консерванта или с консервантом в зависимости от группы определяемых компонентов вод. В табл. 5.1 приведены группы компонентов вод и условия отбора проб для их анализа.

Таблица 5.1

*Компоненты воды и способ их консервации*

Определяемый компонент	Посуда	Объём, мл	Консервант
pH, CO <sub>2</sub> , CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl <sup>-</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	полиэт.	1000	не консервируется
Фульво- и гуминовые кислоты	полиэт.	1000	не консервируется
РЗЭ, Au и др. (для ИНАА)	полиэт.	500	не консервируется
Газовый состав	стекло	200	нас. NaCl
Микробиологический состав	стекло	200	стерилизация
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	стекло	500	2,5 мл хлороформа
Al	стекло	200	1 мл HCl
Fe <sub>общ</sub>	стекло	100	0,5 мл HNO <sub>3</sub>
Перманганатная окисляемость	стекло	200	4 мл H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1...2)
XПК	стекло	50	1 мл H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1...2)
Hg	стекло	100	1 мл HNO <sub>3</sub> + 0,5 мл 4 % K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>
Zn, Cd, Hg, Cu, Bi, As, Mn	стекло	200	1 мл HNO <sub>3</sub>
Na, K, Li, Sr	полиэт.	100	1 мл HNO <sub>3</sub>
Микрокомпоненты «Метода ТПИ»	полиэт.	1000	в поле (бромкрезол + HCl до желтого цвета)
Si, F <sup>-</sup> , J <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup>	полиэт.	200	не консервируется

Можно отобрать пробу, 1 л без консервации, для отправки на анализ в стационарную лабораторию. Проба должна быть проанализирована не позже 72 часов после отбора.

Качество отбора пробы воды играет большую роль в процессе установления истинного состава воды. При отборе пробы воды соблюдают ряд условий.

1. *Анализируемые компоненты воды должны сохраняться в пробе* (не адсорбироваться на стенках посуды, не выпадать в осадок, не подвергаться кислородному и микробиологическому окислению). Для этого в пробу воды добавляют специальные реактивы – консерванты компонентов вод.

2. *Проба воды должна быть представительной*, т. е. оптимальной по размеру. Большую пробу сложно поставлять в лабораторию, с ма-



ленькими пробами сложно работать при анализе. Объем представительной пробы ( $G$ ) рассчитывают по формуле

$$G = \sum_{i=1}^m n \cdot g_n,$$

где  $g_n$  – объем каждого из параллельного анализа, мл;  $n$  – число параллельных анализов;  $m$  – число определяемых компонентов в пробе воды.

Обычно *проба* представляет собой сумму инкрементов (составляющих частей пробы), взятых за определенный интервал времени с частотой  $1/T$ , где  $T$  – временной промежуток между последовательными отборами инкрементов. Если инкременты представляют собой части анализируемого объекта, но являются представительными, то их называют *партиями*.

Когда эти инкременты представляют собой реальные пробы, используемые для составления больших проб (например, поверхностные воды бассейна р. Оби), то их называют *пробами для создания выборки большого объема*.

3. Кроме того, на качество пробы могут оказывать *неблагоприятное влияние субъективные факторы*, а именно: неправильное взятие пробы воды для анализа; неудачный способ вскрытия пробы; загрязнение пробы воды.

**Требования к оформлению результатов проботбора.** Сведения о месте отбора проб и условиях, при которых они были отобраны, указывают на этикетке и прикрепляют к емкости для отбора проб. Допускается кодировать данную информацию при помощи нанесения на емкость для отбора проб несмывающейся краской шифра (кода). Результаты определений, выполненных на месте, вносят в протокол испытаний, который заполняется и комплектуется на месте отбора пробы. Результаты отбора проб заносят в акт об отборе, который должен содержать следующую информацию: 1) расположение и наименование места отбора проб, с координатами и любой другой информацией о местонахождении; 2) дату отбора; 3) метод отбора; 4) время отбора; 5) климатические условия окружающей среды при отборе проб; 6) температуру воды при отборе пробы (при необходимости); 7) метод подготовки к хранению (при необходимости); 8) цель исследования воды; 9) другие данные в зависимости от цели отбора проб; 10) должность, фамилию и подпись исполнителя. Пробы аномальных материалов должны иметь описание наблюдаемой аномалии.

**Транспортировка проб.** Емкости с пробами упаковывают таким образом, чтобы упаковка не повлияла на состав пробы и не приводила к потерям определяемых показателей при транспортировании, а также защи-

щала емкости от возможного внешнего загрязнения и поломки. При транспортировании емкости размещают внутри тары (контейнера, ящика, футляра и т. п.), препятствующей загрязнению и повреждению емкостей с пробами. Тара должна быть сконструирована так, чтобы препятствовать самопроизвольному открытию пробок емкостей. Пробы, подлежащие немедленному исследованию, группируют отдельно и отправляют в лабораторию. Для биологических показателей пробы питьевых «чистых» и речных «грязных» вод должны доставляться в отдельных промаркированных контейнерах. После доставки проб контейнеры подлежат дезинфекционной обработке. Пробы, поступающие в лабораторию для исследования, должны быть зарегистрированы в журнале учета с обязательным указанием числа емкостей для каждой пробы. Пробы хранят в условиях, исключающих любое загрязнение емкостей для отбора проб и предотвращающих любое изменение в составе проб (например, рефрижераторные камеры, прохладные и темные помещения).

### **5.2.2. *Опробование атмосферных осадков***

Согласно ГОСТ 17.1.5.05–85 [22], программу отбора проб атмосферных осадков составляют, руководствуясь критериями при составлении программы отбора проб воды в соответствии с требованиями, предъявляемыми к программам пробоотбора воды. Пробы отбирают на метеостанциях или специально оборудованных постах, которые являются представительными для данного района. В зависимости от цели анализа места отбора проб могут размещаться как в зоне влияния отдельных источников загрязнения или их групп, так и вне её. Периодичность отбора проб определяется целями исследований, степенью изменчивости концентраций определяемых компонентов, метеорологическими условиями. Отбирают точечную или объединенную пробу атмосферных осадков. Точечную пробу атмосферных осадков отбирают при отдельном дожде или снегопаде (интервал времени при выпадении не более 1 ч). Объединенная проба атмосферных осадков отбирается за определенный период времени – месяц, декаду, неделю, сутки – и характеризует среднее содержание определяемых компонентов за этот период времени.

Требования к устройствам для отбора, первичной обработки и хранения проб атмосферных осадков должны отвечать нормам для подобных устройств, применяемых на метеорологических станциях и постах, утвержденных Росгидрометом, либо требованиям к эколого-геохимическим работам, установленным в задании. При ручном отборе используют устройства, устанавливаемые на период выпадения осадков. При автоматическом отборе проб используют устройства, которые ав-

томатически открывают крышку над сборной емкостью в начале выпадения осадков и закрывают ее после окончания их выпадения. В качестве сборных емкостей и сосудов для хранения проб используют посуду из химически стойкого материала, например полиэтилена. Отбор проб производят только во время выпадения атмосферных осадков в специально обработанные сборные емкости на высоте 2 м, соответствующей стандартному осадкомеру Третьякова. Пробы твердых осадков (снег, град) переводят в талую воду при комнатной температуре в сборных емкостях. Пленки, образующиеся на поверхности талой воды и на стенках сборной емкости, смывают талой водой в сосуды для хранения пробы.

Для обеспечения точного учета отбираемых проб производят их регистрацию. Содержание изменяющихся во времени компонентов в пробах определяют непосредственно после выпадения осадков и отбора проб. Транспортирование проб в лаборатории для проведения анализа производят в оптимально короткие сроки после отбора проб. При этом применяют специальные ящики, обеспечивающие сохранность и чистоту проб.

### ***5.2.3. Опробование морского и ледникового льда, льда водоемов и водотоков***

Согласно ГОСТ 17.1.5.05–85 [22], программа отбора проб льда должна быть составлена в соответствии с целью последующего определения химического состава и физических свойств воды и предусматривать: 1) перечень определяемых компонентов; 2) требования к месту отбора проб; 3) периодичность и частоту отбора проб; 4) при необходимости – статистическую обработку данных по отбору проб с целью выявления оптимальных величин периодичности и частоты отбора проб. Место, периодичность и частоту отбора проб устанавливают в соответствии с требованиями ГОСТ 2761–84, ГОСТ 17.1.3.07–82\*, ГОСТ 17.1.3.08–82 и ГОСТ 17.1.5.02–80.

Способ отбора проб определяется типом льда (морской и ледниковый лед и лед водоемов и водотоков), целями анализа и перечнем определяемых компонентов. Требования к устройствам для отбора проб льда должны отвечать нормам для подобных устройств, применяемых на метеорологических станциях и постах Госкомгидрометом. Устройства, применяемые для отбора проб, должны удовлетворять следующим требованиям: 1) обеспечивать получение представительной пробы за одну операцию отбора; 2) материал пробоотборников должен обладать повышенной коррозионной устойчивостью (особенно при отборе проб морского льда) и исключать возможность изменения состава отобран-

ной пробы за время ее нахождения в камере пробоотборника; 3) приспособления, используемые для удаления поверхностного слоя льда керна перед анализом и для протаивания керна льда с целью получения талой воды, а также приспособления, применяемые для хранения и транспортирования керна, должны исключать загрязнение получаемой талой воды; 4) комплекты оборудования должны быть компактными и иметь относительно малую массу. Отбор проб морского льда, а также льда водоемов и водотоков для определения главных ионов производят на ровном участке поверхности льда, очищенном от поверхностного снежного покрова, ручным кольцевым буром.

После отбора измеряют длину полученного керна льда. Керн помещают в тройной полиэтиленовый мешок или цилиндрический контейнер с винтовой крышкой, изготовленный из полимерного материала (допускается применять металлический контейнер). Контейнер (мешок) с керном маркируют и хранят при отрицательной температуре до начала анализа. В случае необходимости определения химического состава различных форм льда керн непосредственно на месте отбора должен быть разделен на образцы, соответствующие формам льда. Каждый образец упаковывают и маркируют отдельно. Контейнеры и мешки для хранения проб льда перед использованием обрабатывают аммиачным раствором трилона Б и тщательно промывают дистиллированной водой. Объем отбираемой пробы, необходимый для выполнения анализа, зависит от перечня определяемых компонентов и применяемых методов анализа.

Отбор проб морского льда, а также льда водоемов и водотоков для определения органических загрязняющих веществ выполняют кольцевым буром. Все пробоотборное оборудование и емкости для хранения проб льда непосредственно перед отбором обрабатывают соответствующими растворителями, используемыми для экстракции загрязняющих веществ во время последующего определения их химического состава. Металлические скребки и кольцевой бур, применяемые для удаления со льда поверхностного снежного покрова и отбора проб льда, хранят в чистых полиэтиленовых мешках в условиях, не допускающих загрязнения их поверхности маслами, топливом. Перед анализом поверхностный слой отобранного образца льда удаляют с помощью металлического резака. Хранение и транспортирование отобранных проб осуществляют в ящиках и контейнерах из нержавеющей стали с герметически закрывающейся крышкой.

Отбор проб морского льда и льда водоемов и водотоков для определения неорганических загрязняющих веществ производят кольцевым буром. После отбора керны льда помещают в контейнеры, изготовленные из полимерного материала с винтовой крышкой, или в тройной по-

лиэтиленовый мешок и хранят при отрицательной температуре до начала анализа. Удаление снежного покрова с поверхности льда в точке отбора производят совком из полимерного материала. Мешки и контейнеры для хранения проб, а также совок для удаления снежного покрова хранят в специальном ящике, изготовленном из полимерного материала, и перед отбором выдерживают в течение суток в растворе азотной кислоты и обязательно промывают водой до нейтральной реакции промывных вод. Определение изменяющихся во времени компонентов в пробах, особенно главных ионов, производят непосредственно после отбора проб.

Отбор проб ледникового льда, получаемых бурением без заливки скважины жидкостью, производят непосредственно после выемки керна из бурового снаряда в специальные контейнеры из полимерного материала. При этом из керна выпиливают образец длиной в 1 м, который помещают в герметически завинчивающийся контейнер. Перед использованием поверхность контейнера обрабатывают аммиачным раствором трилона Б, затем обмывают тремя порциями дистиллированной воды общим объемом 2 л и высушивают. Отбор проб ледникового льда, получаемых бурением с заливкой скважины жидкостью (глубинное бурение), производят с предварительной обмывкой поверхности образца керна льда. Перед помещением в контейнер образец устанавливают в штатив с поддоном и обмывают тремя порциями дистиллированной воды общим объемом 2 л.

Для обеспечения точного учета отбираемых проб в зависимости от вида льда производят их регистрацию. Хранение и транспортирование проб льда осуществляют при минусовой температуре, исключающей таяние проб. Для хранения и транспортирования отобранных и упакованных проб используют специальные контейнеры и транспортировочные ящики с откидной крышкой и внутренним покрытием из полимерного материала, обеспечивающие сохранность проб и предотвращающие их загрязнение.

#### ***5.2.4. Контроль качества первичной информации***

Контроль опробования проводится путем повторного отбора проб в объеме 3 %, который производит лицо, не принимавшее участия в первоначальном отборе проб. Контрольное опробование следует проводить в первую очередь на участках, где выявленные геохимические аномалии по геологическим и иным данным маловероятны. Контрольный отбор проб выполняют: а) по выборочным профилям или маршрутам, равномерно размещаемым на исследуемом участке (площади); 2) по отдель-

ным точкам или профилям, нарушающим закономерную геологическую картину и поэтому вызывающую сомнение.

По данным первичного и контрольного опробования подсчитывают погрешность работы, которую следует учитывать при определении величины геохимического фона и выделении геохимических аномалий. В число пар контрольных проб, по которым производится подсчет погрешностей, включают лишь те, где хотя бы по одной пробе из двух обнаружена измеряемая концентрация искомого элемента. Если при этом в другой (основной или контрольной) пробе элемент не обнаружен, ей приписывают концентрацию, равную половине порога чувствительности анализа. Работы, признанные браком, подлежат переделке, а результаты повторных наблюдений подвергают контролю на общих основаниях. Оценки погрешностей учитываются при анализе геохимической информации и истинности выводов.

### **5.2.5. Полевые камеральные работы**

Полевая камеральная обработка материалов эколого-геохимических исследований включает: 1) текущую проверку полноты документации и качества дневников наблюдений; 2) координацию действий маршрутных групп (полевых отрядов); 3) составление и пополнение карт фактического материала геохимического опробования; 4) уточнение карт геологических комплексов, ландшафтного и функционального зонирования и т. д.; 5) первичную обработку проб; 6) формирование партий проб для анализа с учетом материала проб; 7) составление ведомостей и реестров геохимических проб; 8) предварительную обработку результатов анализов в случае полевых определений [112].

### **5.2.6. Контроль качества пробоотбора**

**Факторы, влияющие на качество пробоотбора.** Основными факторами, влияющими на качество отбора проб, являются следующие: 1) загрязнение пробы из-за неподготовленного оборудования для отбора и фильтрования проб, плохого качества консервирующих веществ, неправильного хранения и транспортирования проб, неквалифицированной работы оператора; 2) нестабильность пробы, несоблюдение условий ее хранения и транспортирования; 3) неправильная консервация пробы [71].

**Контроль качества пробоотбора.** Суть контроля качества пробоотбора заключается в проведении анализа *холостых* полевых проб. Холостые полевые пробы дают возможность оценить: 1) чистоту посуды для отбора и хранения проб; 2) чистоту фильтров и фильтрующих

устройств; 3) чистоту пробоотборника; 4) чистоту химических консервирующих веществ и т. д. Для общей оценки качества отбора проб (посуда, фильтры, пробоотборник) отбирают холостые пробы, которые готовят следующим образом. Пробоотборник промывают 2–3 раза дистиллированной (или бидистиллированной при анализе тяжелых металлов) водой. Последней порцией заполняют склянку для отбора проб воды и далее поступают с ней как с обычной пробой. Если требуется по методике анализа, пробу фильтруют, затем добавляют консервирующие вещества, хранят, обрабатывают и анализируют как обычную пробу воды. Эту же партию дистиллированной воды анализируют в лаборатории (лабораторная холостая проба). Сравнение результатов анализа холостой полевой пробы и холостой лабораторной пробы позволяет выявить погрешность, возникшую за счет отбора, обработки и транспортирования проб. Для выяснения источника загрязнения (пробоотборник, посуда, консерванты, транспортирование) в случае необходимости проводят анализ отдельных холостых проб.

### 5.3. Аналитические работы

Аналитические работы при гидрохимических (эколого-геохимических) исследованиях выполняются в полевых и стационарных лабораторных условиях методами, изложенными в соответствующих нормативных документах. Аналитические работы, как правило, включают: 1) *обязательный (опорный) комплекс химических элементов* и их соединений, определяемых во всем массиве проб, отобранных из всех компонентов природной среды (коренные породы, почвы, донные отложения, воды и т. д.); 2) *специальные аналитические определения*, которые проводят либо по пробам определенных компонентов природной среды, либо для решения конкретных задач, обоснованных на подготовительном этапе исследований с учетом специфики геологических, минерагенических, природных или хозяйственных условий конкретных районов.

Необходимыми *этапами обеспечения качества результатов анализа* в лаборатории являются: 1) своевременная поверка (калибровка) средств измерений (СИ); 2) соблюдение правил хранения и сроков годности экземпляров стандартных образцов (СО); 3) соблюдение условий и сроков хранения реактивов, материалов, растворов; 4) контроль качества дистиллированной воды; 5) контроль стабильности градуировочной характеристики; 6) соблюдение условий и правил отбора проб, их доставки и хранения.

*Внутренний контроль* качества результатов анализа проводят для МВИ с установленными показателями качества, регламентированных

НД и допущенных к применению в установленном порядке. Проведение внутреннего контроля и расчет его нормативов основаны на использовании показателей качества методик анализа (или показателей качества результатов анализа, обеспечиваемых в лаборатории при реализации методик анализа). Элементами системы внутреннего контроля являются: 1) контроль качества холостых проб; 2) оперативный контроль процедуры анализа; 3) контроль стабильности результатов анализа. Оперативный контроль процедуры анализа проводит исполнитель анализа с целью проверки готовности лаборатории к проведению анализа рабочих проб или оперативной оценки качества результатов анализа каждой серии рабочих проб, полученных совместно с результатами контрольных измерений.

Оперативный контроль процедуры анализа проводят: 1) при введении методики анализа; 2) при появлении факторов, которые могут повлиять на стабильность процесса анализа (смена партии реактивов, использование средств измерений после ремонта и т. д.); 3) с каждой серией рабочих проб; максимальная серия 15 проб. Контроль стабильности результатов анализа проводят с целью подтверждения лабораторией компетентности в обеспечении качества выдаваемых результатов анализа и оценки деятельности лаборатории в целом путем периодической проверки подконтрольности процедуры выполнения анализа или контроля стабильности результатов анализа с использованием контрольных карт.

Все виды внутреннего контроля проводят на основе информации, получаемой в процессе контрольных измерений, выполняемых с использованием средств контроля. Выводы о качестве результатов анализа, выполняемых в лаборатории, делают на основе выводов о качестве результатов контрольных измерений. Достоверность выводов о качестве результатов анализа зависит от реализуемой формы контроля стабильности результатов анализа, используемого числа контрольных процедур, частоты их проведения.

Выбор алгоритма проведения отдельно взятой контрольной процедуры определяется: 1) контролируемой характеристикой качества результатов анализа (повторяемость, внутрилабораторная прецизионность, погрешность); 2) наличием средств контроля; 3) спецификой метода анализа и определяемого компонента.

В процессе выполнения отдельно взятой контрольной процедуры предусматривают: 1) при контроле повторяемости – выполнение *n* параллельных определений одной пробы; 2) при контроле внутрилабораторной *прецизионности* – выполнение первичного и повторного контрольных измерений одной и той же пробы в условиях внутри лабора-



торной прецизионности; 3) при контроле *погрешности результатов анализа* – выполнение контрольных измерений с использованием тех или иных средств контроля. *Оперативный контроль* процедуры анализа проводят на основе оценки погрешности при реализации отдельно взятой контрольной процедуры.

*Анализ гидрохимических проб* требует учета специфических особенностей поведения элементов в водных растворах. Анализ водных проб включает обнаружение газов, макро- и микрокомпонентов, образующих истинные и коллоидные растворы. В зависимости от поставленной задачи и условий выполнения анализа вод делятся на полевые (сокращенные) и полные.

*При полевых анализах* необходимо определить химический тип вод. Для этого достаточно иметь сведения о физических свойствах исследуемой воды, водородном показателе (рН) и содержании основных макрокомпонентов, к которым относятся  $\text{CO}_2$  (свободный),  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . Для определения макрокомпонентов изготавливают специальные полевые гидрохимические лаборатории. Общий анализ воды, особенно содержание быстроменяющихся компонентов (рН,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{CO}_2$  своб,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), рекомендуется делать с помощью полевой лаборатории. Это касается также и других экспресс-анализов, если они необходимы и входят в комплект полевой лаборатории – для определения  $\text{F}^-$ , Na, Eh, электропроводности ( $\chi$ ), температуры. Значения рН и Eh устанавливают потенциометрическим методом с помощью переносных приборов рН-метра и Eh-метра. Для определения рН воды часто в полевых условиях используют индикаторную универсальную бумагу. Приписная погрешность результатов анализа проб вод в полевых условиях составляет 10 или 30 % в зависимости от диапазона определяемых содержаний компонентов вод.

При стационарных гидрохимических исследованиях для установления содержаний элементов (их соединений) применяются следующие наиболее распространенные методы анализа: атомно-эмиссионный спектральный; атомно-абсорбционный спектральный анализ; масс-спектрометрический с индуктивно связанной плазмой; колориметрический, электрохимические и титриметрические методы анализов, весовой, радиометрический; рентгеноспектральный. Кроме того, в отдельных случаях могут оказаться полезными методы определения свойств различных минералов (декрепитация, ТЭДС сульфидных минералов и др.).

Известные методы анализа делятся на 4 класса и ряд подклассов (табл. 5.2).

Таблица 5.2

*Классификация методов анализа вод*

Классы методов анализа	Подклассы методов анализа	Методы анализа
Химический		Объёмный (титриметрический)
Физико-химические	Оптические, спектрометрические	Атомно-эмиссионная спектрометрия
		Атомно-абсорбционная спектрометрия
		Молекулярный абсорбционный анализ
		Нейтронно-активационный анализ
		Масс-спектрометрия
	Электрохимические	Потенциометрия
		Кондуктометрия
		Полярография, инверсионная вольт-амперометрия
	Хроматографические	Газовая хроматография
		Ионообменная хроматография
Хромато-масс-спектрометрия		
Физические	Гравиметрия	Весовой
	Радиометрия	Измерение $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ -излучения

**5.4. Камеральные работы**

В зависимости от задач исследований в состав камеральных работ может входить [112]:

1) сбор и систематизация ретроспективных гидрохимических (эколого-геохимических) данных удовлетворительного качества;

2) систематизация и оценка качества вновь полученных аналитических данных, формирование партий дубликатов вновь полученных и/или отобранных ранее проб на дополнительные, повторные и контрольные анализы;

3) подготовка и ввод аналитических данных в полистный аналитический блок банка данных и компьютерная обработка геохимической информации по комплексу прикладных программ;

4) анализ полевой документации;

5) корректировка и создание цифровых вспомогательных карт с учетом результатов полевых исследований и результатов просмотра шлифов;

6) создание и анализ цифровых многоэлементных и полиэлементных геохимических карт по опробованным компонентам природной среды, увязка результатов компьютерной обработки аналитических данных с имеющимися картами;

7) составление выборок по фоновым участкам природной среды, расчет параметров фоновых распределений;

8) составление выборок по ландшафтными таксонам, геологическим комплексам, предварительная оценка их геохимической специализации, выявление недостаточно геохимически охарактеризованных ландшафтов, геологических комплексов;

9) выявление моноэлементных и полиэлементных геохимических аномалий по опробованным компонентам природной среды, составление цифровой карты гидрохимических (эколого-геохимических) аномалий, расчет характеристик геохимических аномалий;

10) интерпретация генезиса выявленных геохимических аномалий с разделением их на природные (рудогенные, петрогенные, ландшафтные), техногенные, смешанного и неопределенного генезиса;

11) выделение участков и выбор конкретных мест и компонентов для опробования с целью проведения повторных (контрольных) и специальных анализов;

12) уточнение характеристик ландшафтов, геологических комплексов, геохимических полей, генезиса выявленных геохимических аномалий с учетом данных контрольных и специальных анализов;

13) составление цифровых предварительных вариантов итоговых карт: ландшафтно-геохимической, геохимической специализации геологических комплексов, прогнозно-геохимической, эколого-геохимической и агрогеохимической;

14) корректировка границ ландшафтно-геохимической карты и карты геохимической специализации геологических комплексов;

15) оценка рудогенных полей, определение их связи с известными рудными объектами;

16) оценка площадей загрязнения территории токсичными химическими элементами, обоснование их связи с источниками загрязнения;

17) оценка уровня плодородия и степени загрязнения с/х почв токсичными химическими элементами;

18) составление кадастров данных;

19) уточнение легенд базовых и итоговых геохимических карт;

20) составление окончательного комплекта цифровых итоговых карт;

21) составление объяснительной записки к комплекту карт.

Заключительным этапом эколого-геохимических исследований является разработка отчёта, который, как правило, должен удовлетворять требованиям [105, 112] и содержать следующие разделы и сведения: 1) введение; 2) изученность; 3) методы и методика исследований (полевых, лабораторных, камеральных); 4) характеристика природных и тех-

ногенных условий; 5) результаты исследований; 6) основные выводы (заключение).

Во *введении* приводится обоснование выполненных исследований, их цели и задачи, краткие данные об объекте исследований, сроки проведения исследований, состав исполнителей и др.

В разделе «*Изученность....*» указывается наличие материалов специально уполномоченных государственных органов в области охраны окружающей среды и других министерств и ведомств, осуществляющих эколого-геохимические исследования и мониторинг окружающей природной среды, а также материалов инженерно-экологических изысканий и геологоразведочных прошлых лет; данные по объектам-аналогам, функционирующим в сходных ландшафтно-климатических и геологоструктурных условиях. На основе приведённых данных делается вывод об актуальности дальнейших исследований.

В разделе «*Методы и методика исследований*» с учётом данных раздела «*Изученность....*» обосновывается необходимость применения используемых методов и методик полевых, лабораторных и камеральных работ с описанием их погрешностей; приводятся данные о лицензиях, допусках, членстве в саморегулирующих организациях, аккредитации лабораторий и т. д.

Раздел «*Характеристика природных и техногенных условий*» содержит описание климатических и ландшафтных условий, включая региональные особенности местности (урочища, фации, их распространение), освоенности (нарушенности) местности, заболачивания, опустынивания, эрозии, особо охраняемых территорий (статус, ценность, назначение, расположение), а также геоморфологических, гидрологических, геологических, гидрогеологических, инженерно-геологических и иных условий. На основе приведенных в разделе данных приводится обоснование выбора исследуемых объектов, их местоположения, сроков проведения работ и т. д.

Раздел «*Результаты исследований*» отражает специфику выполненных работ. Тем не менее, в нём должны быть приведены результаты полевых, лабораторных и камеральных работ, на их основе сформулированы основные выводы, охарактеризована степень выполнения поставленных задач, обоснованы причины отклонения от программы исследований.

В *заключении* приводятся основные выводы, полученные в результате исследований, характеризуется соответствие поставленных задач, выполненных работ и полученных результатов, кратко обосновываются причины отклонения от первоначального задания, формулируются задачи дальнейших исследований.

## Контрольные вопросы и задания

1. Какой состав подготовительных работ в гидрохимических (эколого-геохимических) исследованиях?
2. Какой состав материалов, подлежащих сбору и анализу на подготовительном этапе исследований?
3. Что включает анализ гидрохимической (эколого-геохимической изученности)? При каких условиях эта изученность может быть признана удовлетворительной?
4. Перечислите основные разделы, которые должны входить в состав проекта гидрохимических (эколого-геохимических) исследований.
5. Какова цель и примерный состав полевых работ при проведении гидрохимических исследований?
6. Какие основные этапы отбора и подготовки проб поверхностных, подземных и атмосферных вод существуют?
7. Какие факторы определяют качество геохимических данных на этапе пробоотбора?
8. Какие аналитические методы гидрохимических исследований наиболее часто используются в РФ? Каковы их преимущества и недостатки?
9. В чем заключаются основные условия проведения аналитических работ? Какая информация поступает из лаборатории по результатам анализов?
10. Какой примерный состав камеральных работ при проведении гидрохимических (эколого-геохимических) исследований?
11. Каковы состав и содержание отчёта о выполненных гидрохимических (эколого-геохимических) исследований?

## 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД

### 6.1. Общие подходы к математическому моделированию

Построение и использование моделей является мощным инструментом познания, применяемым всеми научными дисциплинами о живой, неживой природе и обществе, в том числе и в гидрохимии. Развитие науки показало эффективность изучения сложных объектов и процессов с помощью моделей, воспроизводящих эти объекты и процессы в упрощённом виде и позволяющих исследовать многогранные процессы по частям и в целом. Существует два основных подхода к моделированию – физическое и математическое моделирование. Физическое (аналоговое) моделирование предполагает соответствие физических свойств объекта и его модели, а математическое – тождество их математического описания [116]. В последнем случае достигается, как правило, более глубокое, по сравнению с физическим моделированием, понимание исследуемого объекта, причём часто при меньших затратах времени и финансовых и материальных ресурсов. С учётом этого далее пойдёт речь именно о математическом моделировании гидрологических процессов. Но прежде следует осветить общие подходы и методы такого моделирования.

Математическое моделирование представляет собой исследование рассматриваемого объекта путём создания математической модели, под которой обычно понимается совокупность математических объектов и отношений между ними, отражающая важнейшие свойства исследуемого объекта [114], и оперирование ею с целью получения полезной информации о данном объекте [37]. Математическое моделирование носит итерационный характер и включает в себя: 1) разработку математической модели; 2) выбор метода исследования математической модели; 3) анализ результатов математического моделирования. В свою очередь, в разработке математической модели исследуемого объекта можно выделить следующие основные этапы: 1) постановка задачи; 2) выбор типа модели.

Первый этап собственно разработки математической модели – постановка задачи – предполагает определение объекта и целей исследования, задание критериев (признаков) изучения объектов и управления ими. Неправильная или неполная постановка задачи может свести на нет результаты всех последующих этапов. Весьма важным на этом этапе является установление границ области влияния изучаемого объекта.

Границы области влияния объекта определяются областью значимого взаимодействия с внешними объектами. Данная область может быть определена на основе следующих признаков: границы области охватывают те элементы, воздействие которых на исследуемый объект не равно нулю; за этими границами действие исследуемого объекта на внешние объекты стремится к нулю. Учёт области влияния объекта при математическом моделировании позволяет включить в эту модель все существенные факторы и рассматривать моделируемую систему как замкнутую (с целью упрощения исследуемого объекта), т. е. с известной степенью приближения, независимую от внешней среды [64].

Второй этап разработки модели заключается в выборе её типа. При этом обычно последовательно строится несколько моделей. Сравнение результатов их исследования с реальностью позволяет установить наилучшую из них. При этом необходимо отметить, что, как правило, объектом исследования является некая система, под которой, согласно [99], понимается нечто сложное и единое, характеризующееся наличием ряда элементов, их свойств и связей между ними. Взаиморасположение этих элементов формирует структуру (строение) системы, а внешнее проявление их свойств – функции. Некоторые авторы полагают, что при изучении системы необходимо рассматривать и её цель (предвосхищение результата) с точки зрения исследователя, исходя из того, что любая система представляет собой отражение в сознании субъекта (исследователя) объекта исследования [99, 116], что, в свою очередь, позволяет ввести понятие эффективности системы – соответствие требуемого и достигаемого результата. Но во многих случаях цель системы не очевидна. Можно лишь предположить, что большинство существующих в реальности систем стремится к самосохранению и развитию, в том числе и за счёт отдельных элементов и/или процессов, противоположным общей цели системы.

Согласно [99], любая система обладает общесистемными, структурными и функциональными свойствами. В частности, к общесистемным свойствам относятся целостность (внутреннее единство объекта, его дифференцированность от окружающей среды [116]), устойчивость (способность возвращаться в состояние равновесия после внешних и внутренних воздействий), наблюдаемость, управляемость, открытость, динамичность, к структурным – состав, связность, организация, сложность, размер, к функциональным – результативность, ресурсоёмкость, оперативность, экономичность, активность, мощность, мобильность, производительность, быстрдействие, точность, способность развиваться и т. д. Всякая система имеет входы и выходы из нее. Входами могут быть качество исходной воды, дефицит водных ресурсов, требования

выполнения каких-либо нормативных документов и т. д. Система обычно подвержена возмущениям, для компенсации которых используют управляющие воздействия. Входы, выходы, возмущения, управляющие воздействия могут представлять собой: 1) вещества; 2) энергию; 3) информацию.

Все системы можно условно разделить на малые и большие. Малые системы однозначно определяются свойствами процесса и ограничены одним типовым процессом, его внутренними связями, а также особенностями средств реализации процесса. Большие системы представляют собой совокупность малых систем и отличаются от них в количественном и качественном отношении. Большим системам присущи: 1) определенная целостность, наличие общих цели и назначения; 2) большие размеры, большое количество выполняемых функций; 3) сложность поведения; 4) наличие состязательных, конкурирующих сторон (в системе могут протекать противоположно направленные процессы, стремящиеся уменьшить ее эффективность). Функционирование большой системы можно расчленить на определенное число однотипных элементов, в которых протекают типовые процессы, выделение которых проводится на основе анализа идентичности материальных, энергетических и информационных связей между элементами системы (согласно [117], различают большие системы, состоящие из большого числа однотипных элементов с однотипными связями, и сложные системы – системы из разнотипных элементов с разнотипными связями).

Типовой процесс содержит все необходимые и достаточные характеристики, позволяющие выделить его из большого многообразия явлений. При этом учитывается также целевое назначение процесса. По своей природе процессы подразделяются на детерминированные и стохастические. Детерминированным называется такой процесс, в котором определяющие величины изменяются непрерывно по вполне определенным закономерностям. При этом значение выходной величины, характеризующей процесс, однозначно определяется значением входной величины. Для описания детерминированных процессов применяют методы классического анализа и численные методы. Стохастическим (случайным) называется такой процесс, в котором изменение определяющих величин происходит беспорядочно и часто дискретно. При этом значение выходной величины не находится в соответствии с входной. Для описания стохастических процессов используют статистические и вероятностные методы.

Кроме указанных выше простых и сложных, малых и больших, стохастических и детерминированных, также системы можно разделить: 1) по виду отображаемых объектов (технические, биологические и т. д.); 2) виду научного направления (математические, физические, химиче-



ские и т. д.); 3) принадлежности к объективной реальности (абстрактные и материальные); 4) способу обмена со средой массой, энергией и информацией (открытые и закрытые); 5) степени организованности (хорошо организованные, плохо организованные или диффузные, самоорганизующиеся); 6) связи между величинами внешнего воздействия на объект и его реакции (линейные и нелинейные); 7) изменению состояния системы во времени (стационарные и нестационарные); 8) характеру рассмотрения времени (дискретные и непрерывные); 9) использованию пространственных координат (модели с сосредоточенными и распределёнными параметрами; в последнем случае, кроме времени, в качестве аргумента используется ещё хотя бы одна координата). Все указанные классификации весьма условны. Например, детерминированные системы можно рассматривать как частный случай стохастических при вероятности, равной единице [33, 99].

В соответствии с классификацией исследуемой системы проводится выбор математической модели с дополнительным выделением промежуточных вариантов и их комбинаций. Например, в последние десятилетия в разных областях науки широкое применение находят детерминировано-стохастические модели, а, согласно [10, 11], по признакам непрерывности и стохастичности выделяются четыре обширных класса моделей: непрерывно-детерминированных, дискретно-детерминированных, непрерывно-вероятностных, дискретно-вероятностных. В гидрологии некоторыми авторами также выделяются концептуальные и физико-математические модели [10, 33], хотя есть точки зрения о чрезмерной условности подобного разделения [10, 11]. Важное значение при выборе модели имеет гипотеза о линейности исследуемой системы, поскольку использование линейной математической модели значительно упрощает ее дальнейший анализ благодаря применимости принципа суперпозиции. В соответствии с этим принципом предполагается, что когда на линейную систему воздействуют несколько входных сигналов, то каждый из них фильтруется системой так, будто никакие другие сигналы на нее не действуют, а общий выходной сигнал системы формируется в результате суммирования её реакции на каждый входной сигнал.

Дальнейшая разработка модели заключается в выборе математического аппарата. Согласно [117], основной математический аппарат при построении детерминированных моделей – теория дифференциальных и интегральных уравнений (непрерывно-детерминированные модели), разностных уравнений и конечных автоматов (дискретно-детерминированные модели), при построении стохастических моделей – теория дифференциальных уравнений, массового обслуживания (непрерывно-вероятностные модели), разностных стохастических уравнений, вероятностных автома-

тов (дискретно-вероятностные модели). При этом необходимо отметить, что выбор математического аппарата и модели в целом в значительной степени зависит от количества и качества исходной информации.

Процесс выбора математической модели завершается предварительным контролем размерностей, порядков, характера зависимостей, экстремальных ситуаций, граничных условий, математической замкнутости, физического смысла и устойчивости модели. В частности, контроль размерностей сводится к проверке выполнения правила, согласно которому приравниваться и складываться могут только величины одинаковой размерности; контроль порядков – к проверке порядка складываемых величин и упрощению модели путём отбрасывания явно мало-значительных слагаемых; контроль характера зависимостей – к проверке направления и скорости изменения одних величин при изменении других; контроль экстремальных ситуаций – решения при приближении параметров модели к нулю или бесконечности; контроль граничных условий – соответствия математической модели граничным условиям; контроль математической замкнутости – наличия однозначного решения; контроль физического смысла – физического содержания промежуточных соотношений, используемых при построении математической модели; контроль устойчивости модели – к проверке того, что варьирование исходных данных в рамках имеющихся данных о реальном объекте не приведет к существенному изменению решения [64].

Следующим этапом моделирования является выбор метода исследования, в процессе которого проверяется внешнее и внутреннее правдоподобие модели. При этом учитывается результат классификации. Под внешним правдоподобием понимается ожидаемая степень адекватности математической модели реальному объекту по интересующим исследователя свойствам, а под внутренним правдоподобием – ожидаемая степень точности решения полученных уравнений, составляющих математическую модель объекта. В общем случае степень точности вычислений должна соответствовать степени точности исходных данных. Если вид модели уже выбран, то внешнее правдоподобие модели считается фиксированным, а выбор метода исследования будет целиком определяться необходимой степенью внутреннего правдоподобия.

## **6.2. Детерминированные модели формирования водного стока**

Для решения многочисленных фундаментальных и прикладных задач, включая задачи нормирования сбросов веществ в водные объекты, необходимо математическое описание процессов формирования химического состава поверхностных вод. Исследования в этом направлении

проводятся достаточно давно, и в настоящее время, согласно [44, 46], используются четыре основных вида математических моделей: 1) транспортные (моделирование переноса «консервативных» примесей без учета химических взаимодействий, адсорбции и т. д.); 2) геомиграционные (моделирование переноса и физико-химических взаимодействий); 3) термодинамические (моделируются, прежде всего, химические взаимодействия без учета времени); 4) кинетические (моделируются химические взаимодействия с учетом времени).

В теоретических исследованиях определённое распространение получили геомиграционные модели, которые основываются на упрощении системы дифференциальных уравнений неразрывности жидкости, Навье–Стокса, тепло- и массопереноса в водных массах и донных отложениях. Уравнения массопереноса в воде и донных отложениях в декартовых координатах имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial C_i}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial C_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{C,x} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{C,y} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{C,z} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + f(C_1, \dots, C_N), \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{\partial,i}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\partial,x} \cdot \frac{\partial C_{\partial,i}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{\partial,y} \cdot \frac{\partial C_{\partial,i}}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{\partial,z} \cdot \frac{\partial C_{\partial,i}}{\partial z} \right) + \psi(C_{\partial,1}, \dots, C_{\partial,N}), \end{aligned} \quad (6.2)$$

где  $t$  – координата времени;  $x, y, z$  – координаты пространства;  $v_x, v_y, v_z$  – компоненты скорости жидкости;  $C_i$  и  $C_{\partial,i}$  – концентрация  $i$ -го вещества из  $N$  компонентов химического состава жидкости и донных отложений (далее могут использоваться обозначения  $C$  и  $C_{\partial}$ );  $D_{C,j}$  – коэффициенты турбулентной диффузии вещества в  $j$ -м направлении;  $D_{\partial,j}$  – коэффициенты диффузии вещества в  $j$ -м направлении;  $f$  – функция источника вещества в жидкости;  $\psi$  – функция источника вещества в донных отложениях [7, 35, 50].

Функция источника вещества в общем случае зависит от решения нелинейных уравнений, описывающих химические равновесия, сорбционные процессы, массоперенос между фазами; может иметь вид  $f(C_1, \dots, C_N) = \sum_l \prod_i C_i^{m_i}$ , где  $m_i$  – стехиометрический коэффициент;  $L$  – количество учитываемых химических реакций, протекающих в водной

среде. Например, для обратимой реакции типа  $m \cdot [B] \xrightleftharpoons[k_2]{k_1} [C]$  функция

$f(B, C)$  для вещества  $B$  может быть записана в виде уравнения для скорости реакции:  $f(B, C) = \frac{d[B]}{dt} = -k_1 \cdot [B]^m + k_2 \cdot [C]$ . Следует отметить, что

преобразование уравнения (1.6.1.1) к выражению вида  $f(B, C) = 0$  при ряде допущений представляет собой реализацию термодинамического метода моделирования, широко применяемого при изучении подземных вод и относительно редко и избирательно – при исследовании поверхностных водных объектов.

Методология моделирования гидрохимических процессов на основе положений химической термодинамики и представлении о частичных или локальных равновесиях детально описана в работах Р.В. Гаррелса, Г. Хелгесона, А. Ласага, С.Р. Крайнова, В.М. Швеца, Б.Н. Рыженко, В.Г. Румынина, И.К. Карпова, Ю.В. Шварова, В.А. Мироненко, М.Б. Букаты и др. При этом используются два основных подхода, базирующихся на методе минимизации свободной энергии Гиббса и решении системы уравнений термодинамических констант равновесий при соблюдении баланса масс. Согласно сложившимся представлениям, если в частной закрытой гетерогенной системе отсутствует движение воды или его скорость стремится к нулю, то равновесное состояние является конечным для этой системы, причем степень приближения определяется соотношением скоростей химических реакций и скоростей движения воды [45]. С учетом этого в реальных гидрохимических системах наблюдаются только частичные или локальные равновесия.

Несколько иной точки зрения придерживается ряд других авторов, в частности С.Л. Шварцев [122], по мнению которого «... в системе вода–порода, взятой целиком, невозможно установление равновесия даже в том случае, если вода абсолютно неподвижна, а диффузионные процессы крайне замедлены. В то же время вода при любых скоростях ее движения всегда равновесна с определенным комплексом вторичных минералов, который в этих условиях формируется. И это происходит не локально, а регионально всюду, где есть вода и порода» [2, с. 109–110]. Данный вывод хорошо подтверждается не только для подземных, но и поверхностных вод. Тем не менее в случае поверхностных вод термодинамические модели пока имеют весьма ограниченное распространение, связанное в основном с расчетами величины рН, содержания  $CO_2$  и макрокомпонентов.

Очевидно, что решение уравнений (6.1), (6.2) – задача исключительно сложная, в связи с чем многими авторами иногда рассматривает-

ся упрощенная система одномерных уравнений: уравнения Сен-Венана; одномерное уравнение турбулентной диффузии вещества в водном потоке (6.3); одномерное уравнение диффузии вещества в донных отложениях (6.4).

$$\frac{\partial(C \cdot \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(C \cdot Q)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c \cdot \omega \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + q_* \cdot C_* - f(C), \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial C_\delta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_\delta \cdot \frac{\partial C_\delta}{\partial z} \right) + \psi(C_\delta), \quad (6.4)$$

где  $\omega$  – площадь живого сечения водного потока;  $Q$  – расход воды потока;  $q_*$  – боковой приток воды в водный объект;  $C_*$  – концентрация рассматриваемого вещества в водах, поступающих на участок в размере  $q_*$ .

В ряде случаев функция источника может быть приближенно представлена в виде

$$f(C) = -k_* \cdot A \cdot C, \quad (6.5)$$

или

$$f(C) = -k_* \cdot A \cdot (C - Y), \quad (6.6)$$

где  $Y$  – величина, обычно характеризующая либо фактическую концентрацию вещества в донных отложениях, либо равновесное содержание в растворе;  $k_*$  – удельная скорость поступления вещества;  $A$  – площадь взаимодействия водных масс с веществом. Согласно [133], величина  $A$  обратно пропорциональна диаметру частиц породы, соприкасающихся с водой, и плотности минерала, в них содержащегося. Для взвешенных наносов формула определения площади  $A_i$  взаимодействия воды с  $i$ -м минералом принимает вид

$$A_i = S_B \cdot \frac{6 \cdot \alpha_{m,i}}{\rho_{m,i} \cdot d_s}, \quad (6.7)$$

где  $\alpha_{m,i}$  – коэффициент, учитывающий процентное содержание  $i$ -го минерала;  $\rho_{m,i}$  – плотность  $i$ -го минерала;  $d_s$  – диаметр взвешенных частиц;  $S_B$  – содержание взвешенных веществ. Очевидно, что достоверно оценить удельную скорость перехода в раствор и площадь взаимодействия с водой каждого минерала в конкретный момент времени весьма сложно. Поэтому в ряде случаев в уравнения вводятся площадь живого сечения  $\omega$  и константа  $k$ , учитывающая различие между величинами  $\omega$  и  $A$ , либо единственный параметр –  $k_c$ .

Использование системы уравнений (6.3)–(6.4) также сопряжено с многочисленными затруднениями [5, 97]. Поэтому для получения приемлемых для практического использования расчетных зависимостей обычно рассматривается система усеченных уравнений неразрывности

потока вещества и воды, записанных с помощью уже не частных производных, а в полных дифференциалах:

$$\frac{dQ}{dx} = q_*, \quad (6.8)$$

$$\frac{d(Q \cdot C)}{dx} = q_* \cdot C_*, \quad (6.9)$$

причем подобные уравнения могут описывать приток в водный объект и сточных, и природных вод. Интегрирование этих уравнений приводит к уравнению материального баланса (6.10), которое применительно к потоку сточных вод или притоку  $C_{tr} \cdot q_{tr}$  преобразуется к виду (6.11):

$$C_x \cdot Q_x = C_0 \cdot Q_0 \cdot \gamma + C_{tr} \cdot q_{tr}, \quad (6.10)$$

$$C_x = \frac{C_0 \cdot Q_0 \cdot \gamma + C_{tr} \cdot q_{tr}}{Q_0 \cdot \gamma + q_{tr}}, \quad (6.11)$$

где  $C_x$  и  $Q_x$  – концентрация вещества в воде и расход воды в контрольном створе, расположенном на расстоянии  $X$  от выпуска сточных вод (притока);  $C_0$  и  $Q_0$  – концентрация вещества в воде и расход воды до поступления бокового притока или сточных вод;  $C_{tr}$  и  $Q_{tr}$  – концентрация вещества в сточных водах или притоке и соответствующий расход;  $\gamma$  – коэффициент смешения, характеризующий долю расхода воды в реке, которая смешивается со сточными водами (водами притока).

Полагая, что деструкция вещества в водном потоке описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка (6.12), производится совмещение решения этого уравнения в виде зависимости (6.13) и уравнения (6.11), результатом чего является выражение (6.14):

$$\frac{dC}{dt} = -k_c \cdot C, \quad (6.12)$$

$$C = C_0 \cdot \exp(-k_c \cdot t), \quad (6.13)$$

$$C_x = \frac{C_0 \cdot Q_0 \cdot \gamma + C_{tr} \cdot q_{tr}}{Q_0 \cdot \gamma + q_{tr}} \cdot \exp(-k_c \cdot t), \quad (6.14)$$

где  $C_0$  – концентрация вещества в начальный момент времени  $t = 0$ , например в момент смешения природных и сточных вод;  $C_x$  – концентрация вещества в контрольном створе исследуемого водного объекта. Величина  $k_c$  в общем случае зависит от температуры водной среды и может быть определена по данным наблюдений или по специальным таблицам с учетом температуры воды. Введя переменную  $n$  (кратность разбавления), преобразуем (6.14) к виду (6.16):

$$n = \frac{\gamma \cdot Q_0 + q_{tr}}{q_{tr}}, \quad (6.15)$$

$$C_x = C_0 + \frac{C_{tr} - C_0}{n} \cdot \exp(-k_c \cdot t). \quad (6.16)$$

Обобщение уравнения (6.16) для водосбора реки или его участка позволяет получить выражение:

$$C_x = C_{0,1} \cdot \exp(-k_{c,1} \cdot t_1) + \sum_{i=1}^N \frac{(C_{tr,i} \cdot \exp(-k_{c,2} \cdot t_{1,i}) - C_{0,1} \cdot \exp(-k_{c,1} \cdot t_1))}{n_i}, \quad (6.17)$$

где  $C_x$  и  $C_{0,1}$  – концентрация вещества в расчетном створе и выше по течению от источников загрязнения;  $C_{tr,i}$  – концентрация вещества в сточных водах  $i$ -го выпуска (или концентрация вещества в притоке);  $N$  – количество источников загрязнения и притоков;  $k_{c,1}$  и  $k_{c,2}$  – коэффициенты самоочищения речных вод в естественных условиях и под влиянием  $i$ -го выпуска или притока;  $t_1$  и  $t_{1,i}$  – время добегания водных масс от первого створа, расположенного выше по течению от источников загрязнения, и от  $i$ -го выпуска до расчетного створа;  $n_i$  – кратность разбавления сточных вод  $i$ -го выпуска или притока. Отличия в подходах к реализации данной модели в основном заключаются в разных трактовках места определения параметров  $C_0$  и  $k_c$  (выше по течению от всех источников загрязнения либо каждого  $i$ -го выпуска), а также в способах расчета кратности разбавления. Чаще всего рекомендуется определять величину  $n_i$  по методу В.А. Фролова – И.Д. Родзиллера, сводящегося к расчёту коэффициента смешения  $\gamma$  по формуле

$$\gamma = \frac{1 - \exp(-\alpha \cdot \sqrt[3]{L_\Phi})}{1 + \frac{Q}{q_{ст}} \cdot \exp(-\alpha \cdot \sqrt[3]{L_\Phi})}, \quad (6.18)$$

где  $L_\Phi$  – расстояние от выпуска до контрольного створа по фарватеру, м;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от гидравлических условий потока и определяемый по формуле

$$\alpha = \varphi \cdot \xi \cdot \sqrt[3]{\frac{D_c}{q_{ст}}}, \quad (6.19)$$

где  $\varphi$  – коэффициент извилистости (отношение расстояния до контрольного створа по фарватеру к расстоянию по прямой);  $\xi$  – коэффициент, зависящий от места выпуска сточных вод (при выпуске у берега  $\xi = 1$ , при выпуске в стрежень реки  $\xi = 1,5$ ). Применительно к рассматриваемому методу коэффициент турбулентной диффузии в [55] рекомендуется рассчитывать по формуле

$$D_c = \frac{g \cdot v_{ср} \cdot h_{ср}}{37 \cdot n_{ш} \cdot C_{ш}^2}, \quad (6.20)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ );  $n_{ш}$  – коэффициент шероховатости ложка реки;  $v_{ср}$  – средняя скорость течения, м/с;  $C_{ш}$  – коэффици-

ент Шези ( $m^{0.5}/c$ ). В случае проведения расчетов в период ледостава в формулу (6.20) вместо глубины потока  $h_{cp}$  вводится значение  $0,5 \cdot h_{cp}$ , а вместо коэффициента шероховатости ложа  $n_{ш}$  – его приведенное значение  $n_{ш.пр}$ :

$$n_{ш.пр} = n_{ш} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{n_{п}}{n_{ш}} \right)^{1,5} \right]^{0,67}, \quad (6.21)$$

где  $n_{п}$  – коэффициент шероховатости нижней поверхности льда, принимаемый по специальной таблице в зависимости от продолжительности ледостава.

Модели (6.16), (6.17), на первый взгляд, отличаются простотой. Однако они и характеризуют основные процессы антропогенн трансформации химического состава поверхностных вод за счёт их смешения со стоками (притоками) и деструкции загрязняющих веществ. Однако это не совсем верно из-за целого ряда причин. Перечислим лишь некоторые из них: 1) в модели с целью учета разнообразных природно-техногенных условий используются многочисленные коэффициенты, определение которых приводит к неоправданному усложнению расчетов и накоплению погрешности расчетов; 2) изменение концентраций веществ далеко не всегда может быть описано уравнением (6.16); 3) в настоящее время отсутствует теоретическое обоснование способа расчета параметра  $C_{ф}$ , имеющего смысл фоновой концентрации.

С учётом указанных недостатков и при необходимости более подробного изучения условий распространения вещества в исследуемом водотоке достаточно часто используются численные методы решения упрощённого уравнения турбулентной диффузии. В частности, в России широко применяется предложенный А.В. Караушевым конечно-разностный метод решения для условий плоской задачи (при допущении преобладающей роли адвективного переноса вещества вдоль русла  $x$  и диффузионного переноса по нормали к оси потока  $y$ ):

$$\frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{D'_C}{v} \cdot \frac{\Delta^2 C}{\Delta y^2}. \quad (6.22)$$

Коэффициент турбулентной диффузии  $D'_C$  рассчитывается следующим образом:

$$D'_C = \frac{g \cdot v_{cp} \cdot h_{cp}}{M_{ш} \cdot C_{ш}}. \quad (6.23)$$

Более полный учет поперечной циркуляции в потоке и его кинематической неоднородности проводится путем ввода поправочного коэффициента  $\varepsilon_k$  в выражение для расчета коэффициента диффузии:

$$D''_C = k_{ny} \cdot D'_C, \quad (6.24)$$



$$\lg k_{\text{ш}} = 0,25 \cdot \theta \cdot (1 + 0,54 \cdot \varepsilon_k) + 0,589 \cdot \varepsilon_k - 0,356, \quad (6.25)$$

$$\varepsilon_k = 1 + \frac{0,0042 \cdot h_{\text{cp}}}{R_{\text{изл}}} \cdot M_{\text{ш}} \cdot C_{\text{ш}} \cdot \sqrt{M_{\text{ш}} \cdot C_{\text{ш}}}, \quad (6.26)$$

$$\theta_k = \frac{h_m - h_{\text{cp}}}{h_{\text{cp}}}, \quad (6.27)$$

где  $h_m$  – максимальная из средних на участке глубина, м.

При расчете речной поток в плане разбивается сеткой, размеры ячеек которой определяются следующими зависимостями:

$$b_k = \frac{q_{\text{ст}}}{h_{\text{cp}} \cdot v_{\text{cp}}}, \quad (6.28)$$

$$\begin{cases} \Delta y \geq 0,5 \cdot b_k \\ \Delta y \leq 0,1 \cdot B_p \end{cases}, \quad (6.29)$$

$$\Delta x = v_{\text{cp}} \cdot \frac{\Delta y^2}{2 \cdot D_C^*}, \quad (6.30)$$

где  $b_k$  – ширина загрязненной струи;  $B_p$  – средняя ширина потока;  $D_C^*$  –  $D_C'$  или  $D_C''$ . Краевые условия задаются соотношениями:

$$\begin{cases} \left. \frac{\Delta C}{\Delta y} \right|_{\text{граница}} = 0 \\ C_0 = C_{\text{ст}} \end{cases}, \quad (6.31)$$

Концентрация вещества определяется как среднее между значениями двух соприкасающихся ячеек:

$$C_{i+1,j} = 0,5 \cdot (C_{i,j+1} + C_{i,j-1}), \quad (6.32)$$

где  $i$  и  $j$  – шаг вдоль и поперек потока. Искомой величиной (концентрация нормируемого вещества в максимально загрязненной струе) является максимальное значение в контрольном створе. В целом данный метод, несмотря на грубость схематизации процесса переноса исследуемого вещества, по сравнению с прочими общепринятыми методами, позволяет получить наиболее полную картину изменения химического состава речных вод.

### 6.3. Пример детерминированной модели формирования минерализации речных вод под влиянием выпусков сточных вод

Рассматриваемая модель вида (6.17) разработана для анализа антропогенного влияния на минерализацию (по сумме главных ионов) вод р. Томи – крупного притока р. Оби (Западная Сибирь). Расчёт проводится для наиболее крупных восемнадцати выпусков с расходами сточных вод более  $5000 \text{ м}^3/\text{сут}$ , а также ряда притоков (пр. Уса, Мрас-Су, Кондома, Верхняя, Средняя и Нижняя Терси, Тайдон, Аба, Ускат, Искитимка, Ушайка, Киргизка). Кратность разбавления сточных вод  $i$ -го выпуска или притока определяется по методу Фролова–Родзиллера.

Проведенные расчёты самоочищения речных вод позволили получить общую картину изменения минерализации в максимально загрязненной струе потока по длине р. Томи в зимнюю межень (рис. 6.1). Анализ результатов вычислений и их сопоставление со среднесезонными показателями для этого времени года выявили заметные отличия между измеренными и расчетными величинами, особенно в районе г. Томска, что можно интерпретировать как подтверждение сделанного в работах [85] вывода о наличии достаточно эффективного механизма регулирования минерализации речных вод, определяемого характером и интенсивностью взаимодействий в системе «вода – порода – органическое вещество».

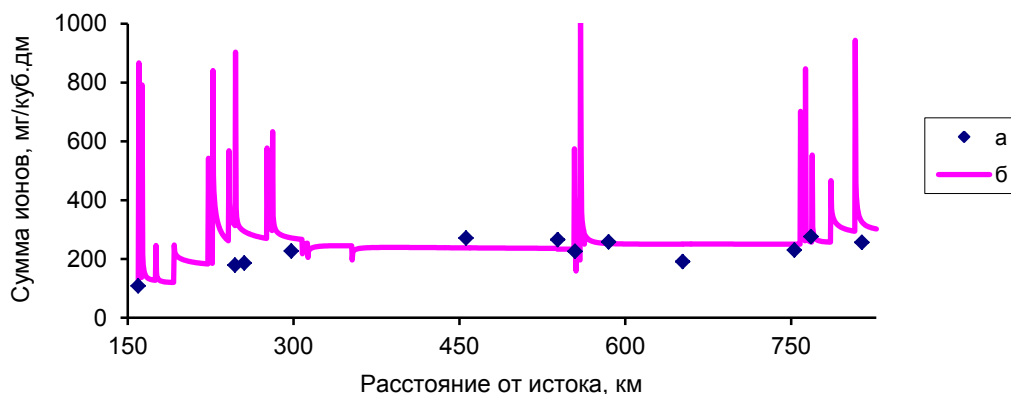


Рис. 6.1. Изменение измеренных (а) и расчетных (б) значений минерализации вод р. Томи в максимально загрязненной струе в зимнюю межень

Не затрагивая подробно этот вопрос, отметим, что если бы минерализация вод р. Томи формировалась только в результате процессов смешения сточных и речных вод, то минерализация вод этой реки на участке от г. Новокузнецка до с. Салтымаково была бы примерно в пол-

тора раза выше по сравнению с наблюдаемыми величинами, а ниже по течению от г. Кемерово, где отсутствуют значительные притоки, не наблюдалось бы уменьшение минерализации. Кроме того, сравнение гидрохимических показателей речных и грунтовых вод свидетельствует о сопоставимости минерализации вод р. Томи в зимний период и подземных вод четвертичных отложений на территории её водосбора. Это позволяет сделать вывод о том, что именно грунтовый приток и внутриводные процессы и определяют основные черты химического состава речных вод на большом протяжении Томи в зимнюю межень.

#### 6.4. Стохастические модели формирования химического состава вод

Стохастические и детерминировано-стохастические модели формирования содержаний отдельных веществ в природных водах пока не нашли такого широкого распространения, как соответствующие модели водного стока. В основном они применяются либо при восстановлении рядов наблюдений, либо для оперативного прогнозирования, причём обычно с использованием зависимостей между содержанием веществ и расходом воды или связей между некоторыми гидрохимическими показателями [55, 108]. Теоретическое обоснование подобных зависимостей с определёнными допущениями и упрощениями может быть получено при решении уравнения диффузии [88], в частности в виде

$$C_t = C_0 \cdot \left( \frac{Q_t}{Q_0} \right)^{-\frac{k}{\lambda}}, \quad (6.33)$$

где  $k$  и  $\lambda$  – удельные скорости изменения концентрации вещества и изменения расхода воды;  $C_t$  и  $Q_t$  – концентрация вещества и расход воды в момент времени  $t$ ;  $Q_0$  – расход воды, соответствующий устойчивому состоянию  $C_0$ . Как было показано в [85], это устойчивое состояние соответствует условно равновесному состоянию системы «вода–порода», сформировавшемуся под влиянием природных и антропогенных факторов за статистически однородный период. Состояние системы в целом неравновесно, но отдельные её части квазиравновесны и имеют термодинамические параметры, время изменения которых больше времени релаксации в этих частях и намного меньше времени, за которое устанавливается равновесие во всей системе.

В отдельной малой подсистеме протекает  $L$  химических реакций, которые можно объединить в одну суммарную реакцию, описываемую выражением

$$\Delta G_T = RT \left( \sum_{i=1}^L \ln \Pi_i - \ln K_T^0 \right), \quad (6.34)$$

где  $\Delta G_T$  и  $K_0^T$  – общее изменение свободной энергии системы и суммарная константа равновесия при заданной температуре  $T$ ;  $\Pi_i$  – суммарное произведение активностей компонентов, участвующих в каждой из реакций ( $L + 1$  – количество веществ, участвующих в суммарной реакции). Используя упрощенное уравнение Дебая–Хюккеля для описания связей между активностью иона и его концентрацией, выражение для искомого вещества  $C_x$  может быть преобразовано к виду

$$\ln C_x \approx b_0 - \sum_j^{L_x} b_j \ln C_j, \quad (6.35)$$

где  $L_x$  – количество учитываемых веществ;  $b_0, b_j$  – константы.

Величина  $C_0$  может быть определена как среднее геометрическое в предположении, что вероятность величины  $\ln C$  стремится к  $1/M$ . Тогда для математического ожидания логарифма концентрации рассматриваемого вещества  $E(\ln C)$  допустимо выражение

$$E(\ln C_x) = b_0 - \sum_j^{L_x} b_j \cdot E(\ln C_j). \quad (6.36)$$

Условно равновесное состояние системы «вода–порода» фактически и является фоновым. Соответственно, фоновая концентрация представляет собой математическое ожидание в сложившихся природно-антропогенных условиях и при наличии данных наблюдений может быть рассчитана как среднее геометрическое за статистически однородный период продолжительностью достаточной, чтобы охватить несколько циклов маловодных и многоводных лет, то есть не менее 10–12 лет. С учётом этого можно предположить, что для решения гидрохимических задач, включая разработку стохастических моделей, допустимо использование логнормального закона распределения вероятностей. Данный вывод во многих случаях подтверждается результатами анализа данных гидрохимических наблюдений, а рекомендации по использованию логнормального распределения вошли даже в некоторые нормативные документы [39, 40]. В то же время есть точки зрения о целесообразности применения и других распределений. В частности, Б.Д. Долгоносовым и К.А. Корчагиным [34] обоснована возможность использования степенного и экспоненциального распределения.

## Контрольные вопросы и задания

1. Какие существуют этапы математического моделирования процессов формирования химического состава природных вод? Какова их последовательность?
2. Перечислите источники информации для построения моделей.
3. Что такое стохастические и детерминированные процессы? В чем заключаются структурные особенности моделей стохастических и детерминированных процессов формирования химического состава природных вод?
4. Какие существуют методы расчёта (структура модели, допущения и ограничения) допустимых концентраций загрязняющих веществ, сбрасываемых в реки?
5. Какие существуют методы расчёта (структура модели, допущения и ограничения) допустимых концентраций загрязняющих веществ, сбрасываемых в озёра и водохранилища?
6. Какие существуют методы расчёта (структура модели, допущения и ограничения) допустимых концентраций загрязняющих веществ, сбрасываемых в болота?

## 7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДОПОДГОТОВКИ И ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Природообустройство и водопользование представляют собой взаимосвязанные и взаимодополняющие виды деятельности, направленные на рациональное использование природных ресурсов, их восстановление и охрану. Их техническая реализация осуществляется, как правило, с помощью *гидротехнических сооружений* (сооружений, подвергающихся воздействию водной среды, предназначенных для использования и охраны водных ресурсов, предотвращения вредного воздействия вод, в том числе загрязненных жидкими отходами [104]) и водохозяйственных систем (комплексов взаимосвязанных водных объектов и гидротехнических сооружений, предназначенных для обеспечения рационального использования и охраны вод [12]).

По назначению ГТС подразделяются: 1) на водоподпорные (плотины и дамбы) – сооружения, перекрывающие естественные водотоки или рельеф овражно-балочного типа с целью накопления поверхностного стока (воды) с последующим его перераспределением во времени для подачи водопотребителям; 2) водосбросные (сифоны, шахтного типа, открытые сооружения, служащие для сброса излишков воды из прудов и водохранилищ (в основном в паводковый период) или для их частичного или полного опорожнения; 3) водопроводящие – сооружения, служащие для переброски воды в нужные для производственного цикла места (каналы, туннели, лотки, трубопроводы, водоотводные тракты); 4) водозаборные – сооружения, служащие для забора воды из источников и подачи ее потребителям; 5) регулиционные (выправительные) – сооружения, улучшающие естественные условия протекания водотоков и защищающие русла и берега рек от размыва, отложения наносов, воздействия льда и т. д. (спрямляющие каналы, берегоукрепительные сооружения, струенаправляющие дамбы); 6) специальные – сооружения, служащие для складирования отходов переработки минерального сырья (шламонакопители, хвостохранилища, рассолохранилища и др.), сооружения гидро- и селезащиты, пруды-охладители, градирни, брызгальные бассейны и т. д.

С учётом целей и задач рассматриваемой дисциплины ниже представлены следующие водохозяйственные системы: 1) водозаборы, в том числе на подземных и поверхностных источниках; 2) очистные сооружения и поля орошения. К прочим водохозяйственным системам применимы в целом аналогичные методы обеспечения качества воды.

## 7.1. Водозаборы

*Водозаборные сооружения* (водозабор) – это комплекс гидротехнических сооружений, обеспечивающих забор воды из источника, её предварительную очистку и подачу водопотребителям с требуемыми расходом и напором [69]. По сути, водозаборные сооружения вместе с источником водоснабжения (водоток, водоём, подземным водоносным горизонтом, используемыми для водоснабжения) образует единый природно-техногенный комплекс, причём именно тип и состояние источника водоснабжения определяют конструктивные особенности и условия эксплуатации водозаборных сооружений.

Согласно [32], водозаборные сооружения являются одним из компонентов систем поставки питьевой воды, в составе которых обычно выделяется четыре компонента: 1) источник воды; 2) устройство водозабора и транспортирования; 3) очистка, если это необходимо, и удаление остатков, если это требуется; 4) хранение, транспортирование и распределение. Водозаборная система в составе устройства водозабора и транспортирования обычно включает насосные станции для извлечения воды из подземных или поверхностных источников и для транспортирования ее к очистным сооружениям в случае их наличия. Некоторые системы могут использовать такие источники, которые дают возможность подачи воды самотеком. Перекачивающая сеть может иметь резервуары для хранения внутри системы [32].

Согласно [28], выбор источника водоснабжения должен производиться с учетом его санитарной надежности и возможности получения питьевой воды. Пригодность источника для хозяйственно-питьевого водоснабжения устанавливается на основе: 1) санитарной оценки условий формирования и залегания вод подземного источника водоснабжения; 2) санитарной оценки поверхностного источника водоснабжения, а также прилегающей территории выше и ниже водозабора по течению воды; 3) оценки качества и количества воды источника водоснабжения; 4) санитарной оценки места размещения водозаборных сооружений; 5) прогноза санитарного состояния источников.

В зависимости от качества воды и требуемой степени обработки для доведения ее до показателей ГОСТ 2874 водные объекты, пригодные в качестве источников хозяйственно-питьевого водоснабжения, делят на 3 класса, исходя из следующих критериев: 1) подземные источники водоснабжения: 1-й класс – качество воды по всем показателям удовлетворяет существующим требованиям; 2-й класс – качество воды имеет отклонения по отдельным показателям от требований, которые могут быть устранены аэрированием, фильтрованием, обеззараживани-

ем; источники с непостоянным качеством воды, которое проявляется в сезонных колебаниях сухого остатка в пределах нормативов, требующие профилактического обеззараживания; 3-й класс – доведение качества воды до требований ГОСТ 2874 методами обработки, предусмотренными во 2-м классе, с применением дополнительных – фильтрование с предварительным отстаиванием, использование реагентов и т. д.; 2) поверхностные источники водоснабжения: 1-й класс – для получения воды, соответствующей существующим требованиям, необходимы обеззараживание, фильтрование с коагулированием или без него; 2-й класс – для получения воды, соответствующей требованиям, необходимы коагулирование, отстаивание, фильтрование, обеззараживание (при наличии фитопланктона – микрофильтрование); 3-й класс – доведение качества воды до требований методами обработки, предусмотренными во 2-м классе, с применением дополнительных методов (окислительных и сорбционных, применения еще одной ступени осветления), а также более эффективного обеззараживания воды и т. д.

Состав воды пресноводных подземных и поверхностных источников водоснабжения должен соответствовать следующим требованиям: сухой остаток не более  $1000 \text{ мг/дм}^3$  (по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы допускается до  $1500 \text{ мг/дм}^3$ ), концентрация хлоридов и сульфатов не более 350 и  $500 \text{ мг/дм}^3$  соответственно, общая жесткость не более  $7 \text{ моль/м}^3$  (по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы допускается до  $10 \text{ моль/м}^3$ ), концентрация химических веществ (кроме указанных в табл. 7.1) не должна превышать ПДК для воды хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, а также норм радиационной безопасности. При обнаружении в воде источников водоснабжения химических веществ, относящихся к 1 и 2 классам опасности с одинаковым лимитирующим показателем вредности, сумма отношений обнаруженных концентраций каждого из веществ в воде к их ПДК не должна быть более 1.

Для каждого конкретного водоисточника схема очистки воды и требуемые реагенты устанавливаются на основе технологических исследований или опыта работы сооружений в аналогичных условиях. При несоответствии качества воды источника требованиям указанных классов (солончатые, соленые воды, воды с высоким содержанием фтора и т. п.) он может быть использован по согласованию с органами санитарно-эпидемиологической службы при наличии методов обработки, надежность которых подтверждена специальными технологическими и гигиеническими исследованиями. Мощность водопровода не должна превышать допустимого отбора воды из источника водоснабже-





воды; 3) грунтовые воды, искусственно наполняемые, и подрусловые подземные воды; 4) поверхностные воды (реки, водохранилища, озера, каналы). Возможность использования пригодных для питьевого водоснабжения подземных вод рассматривается и при недостаточных их запасах; восполнение дефицита потребности воды следует производить за счет менее надежных в санитарном отношении водоисточников.

Выбор источника водоснабжения при наличии нескольких источников и равной возможности обеспечения требуемого качества и количества воды должен осуществляться путем технико-экономического сравнения вариантов схем обработки воды с учетом санитарной надежности источников. Из имеющихся источников водоснабжения выбирают лишь те, для которых возможны организация зоны санитарной охраны и соблюдение соответствующего режима в пределах ее поясов.

Выбор источника водоснабжения производится на основании следующих данных: 1) при подземном источнике водоснабжения – анализ качества воды, гидрогеологической характеристики используемого водоносного горизонта, санитарной характеристики местности в районе водозабора, существующих и потенциальных источников загрязнения почвы и водоносных горизонтов; при этом учитываются балансовые запасы подземных вод, утвержденные в установленном порядке в соответствии с классификацией эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод; 2) при поверхностном источнике водоснабжения – анализ качества воды, гидрологических данных, минимальных и средних расходов воды, соответствия их предполагаемому водозабору, санитарной характеристики бассейна, развития промышленности, наличия и возможности появления источников бытового, промышленного и сельскохозяйственного загрязнения в районе предполагаемого водозабора.

Для оценки качества воды в месте предполагаемого водозабора должны быть представлены анализы проб, отбираемых ежемесячно не менее чем за последние 3 года. Класс водоисточника определяется организацией, разрабатывающей проект водоснабжения. Заключение о пригодности источника водоснабжения должно содержать данные: 1) об объекте водоснабжения и санитарной характеристике намечаемого к использованию источника водоснабжения; 2) о качестве воды источника водоснабжения и прогноз его состояния на расчетный срок; 3) о мероприятиях по организации зоны санитарной охраны и намечаемой обработке воды источника водоснабжения с целью довести качество воды до существующих требований.

Согласно [32], эксплуатация и обслуживание системы поставки питьевой воды включают: 1) извлечение; 2) очистку сырой воды; 3) распределение питьевой воды до точки доставки; 4) уменьшение отрабо-

танной воды, очистку и повторное использование такой отработанной воды; 5) безопасное транспортирование и удаление/повторное использование отходов.

Оператор системы поставки питьевой воды разрабатывает план эксплуатации и обслуживания, охватывающий как профилактические, так и корректирующие/ответные мероприятия по обслуживанию. Профилактическое обслуживание должно проводиться исходя из состояния активов или в соответствии с графиком через определенные промежутки времени для предотвращения, минимизации или отсрочки сбоев или остановок, которые могут привести к незапланированным ремонтным работам, или для обеспечения постоянной, результативной эксплуатации активов и для продления срока их службы. Корректирующие или ответные ремонтные работы включают обслуживание, проводимое после сбоя или остановки, куда входят мероприятия, необходимые для ремонта или восстановления активов или систем до удовлетворительного состояния или уровня производительности. Мероприятия и обязанности оператора системы водоснабжения включают перечисленные ниже аспекты: планирование; операции; контроль над эффективностью эксплуатации; обслуживание (осмотр, техническое обслуживание, ремонт, включая, в частности, наблюдение за утечками и восстановление); наблюдение за количеством и качеством воды в источнике, питьевой воды и отходов; пуск в эксплуатацию (остановка, испытание, повторный пуск в эксплуатацию, вывод из эксплуатации); поиск неисправностей (во время обычной работы и вне ее); документация и ведение отчетности; ответная реакция на чрезвычайные ситуации [32].

Качество и непрерывность предоставления питьевой воды потребителям являются приоритетом в области общественного здравоохранения и защиты окружающей среды, поэтому система питьевого водоснабжения должна быть подготовлена к выполнению необходимых действий в случае чрезвычайных ситуаций. Чрезвычайные ситуации могут включать технологические сбои (например, сбои в работе трубопроводов), стихийные бедствия (например, землетрясения и погодные катаклизмы), преступные действия – акты вандализма или террористические акты. Следует разработать план действий в чрезвычайных ситуациях, охватывающий все эти ситуации. Когда питьевая вода прекращает соответствовать стандартам пригодности для питья, следует особо уведомить об этом потребителей. Когда предоставление услуги прерывается, оно должно быть восстановлено как можно скорее. Особое внимание следует уделить нуждам потребителей или зон обслуживания, имеющих критическое значение, а также противопожарной защите. В чрезвычайных ситуациях в

целях минимизации негативного влияния на водоснабжение система питьевого водоснабжения должна иметь план ответных действий [32].

### **7.1.1. Водозаборы из поверхностных источников**

#### *7.1.1.1. Общие требования*

Сооружения для забора поверхностных вод должны обеспечивать: 1) бесперебойную подачу воды в водоводы ГЭС, ГАЭС и НС, магистральные каналы оросительных систем и другим водопользователям; 2) прекращение поступления воды в водоводы и каналы при их плановом осмотре, ремонте в соответствии с режимом эксплуатации и в случае аварии.

Для защиты водоводов и каналов от попадания в них влекомых наносов, плавающих предметов и мусора, топляков, льда, шуги и т. п. следует предусматривать забральные балки, сороудерживающие решетки, запани, шугосбросы, пороги, промывные галереи, отстойники, а также мероприятия по удалению мусора из воды и т. п. Забор воды в местах скопления личинок дрейсены (если не предусмотрены мероприятия по уничтожению дрейсены) не допускается. На ГЭС с безнапорными деривационными водоводами пропуск шуги следует предусматривать преимущественно через турбины (за исключением случая оборудования станции ковшовыми турбинами), при этом следует предусматривать электрообогрев решеток в напорном бассейне.

Состав, конструкцию и компоновку водозаборного сооружения необходимо выбирать в соответствии с его назначением и в зависимости от типа водовода, характера водозабора, условий эксплуатации, природных условий, гидрологического режима водоема и водотока, морфологии берегов и т. п. Например, в случае поверхностных источников водоснабжения применяют: 1) водозаборы с самотечными линиями – в условиях широкой поймы, пологого берега, малых глубин у берега и загрязненности воды у берега; 2) водозаборы с сифонными линиями – в условиях широкой и высоко затапливаемой поймы, сложной инженерно-геологической обстановки при прокладке самотечных линий; 3) береговой водозабор раздельного типа – в условиях высокого, крутого берега, при наличии достаточных глубин у берега, обеспечивающих нормальное положение водоприемных окон, значительных колебаний уровней воды; 4) береговой водозабор совмещенного типа – в тех же условиях, что и у раздельного типа, но при наличии хороших грунтовых условий (скальных пород); 5) ковшовый водозабор с верховым входом воды – при большом количестве наносов и незначительной шугоносности реки; 6) ковшовый водозабор с низовым входом воды –

при большой шугоносности реки и незначительном стоке наносов; 7) плавучие и передвижные водозаборы – при временных системах водоснабжения и больших колебаниях уровней воды в реке [110].

Водоприемник, как правило, следует проектировать из нескольких секций для обеспечения возможности отключения любой секции для ремонта или очистки. Водозаборы питьевого назначения из водохранилищ следует располагать с учетом переработки береговой линии, фактического и прогнозируемого качества воды на возможных участках их размещения, интенсивности аэрации и сгонно-нагонных течений, а также количественного содержания в поверхностных токах воды биомассы, в том числе и водорослей.

Выбор типа водозабора следует производить в зависимости от уровней воды в реке и уровней, требуемых в проектируемом магистральном канале, с учетом топографических, гидрологических и геологических условий. В случае недостаточности превышения уровня воды в реке в створе водозабора над уровнем воды в канале следует предусматривать плотинный водозабор. Допускается заменять плотинный водозабор водозабором с механическим водоподъемом насосными станциями. За расчетный уровень следует принимать: при бесплотинном водозаборе – бытовой или зарегулированный вышерасположенным водохранилищем уровень воды при прохождении расчетного максимального расхода воды основного расчетного случая с учетом русловых процессов; при плотинном водозаборе – уровень воды в верхнем бьефе при пропуске расчетного максимального расхода воды, соответствующего поверочному расчетному случаю.

Защиту от попадания в водоводы влекомых наносов следует осуществлять путем обеспечения забора воды из верхних осветленных слоев потока, а также устройством на входе в водоприемник высоких порогов с донными промывными отверстиями, косо направленными донными порогами и экранирующими стенками, водоприемными ковшами, струенаправляющими щитами и шпор, регулиционными и выправительными сооружениями, кроме того, проведением других мероприятий, прошедших проверку в условиях эксплуатации построенных водозаборных гидроузлов. Конструкция и размеры водозаборных сооружений из источников небольшой мощности должны обеспечивать их нормальную работу в условиях движения в потоке воды отмершей водной или пустынно-степной растительности, заносимой в источник ветром.

При невозможности пропуска льда и шуги через турбины в зависимости от ледошугового режима водотока и условий эксплуатации надлежит предусматривать: 1) создание условий для образования ледяного покрова в верхнем бьефе при наличии соответствующих температурного и скоростного режимов водотока; 2) задержание шуги и по-

верхностного льда в верхнем бьефе; 3) сброс шуги и поверхностного льда в головном узле через плотину; 4) сброс шуги через шугосбросные сооружения на канале или в напорном бассейне при отсутствии возможности задержания шуги в верхнем бьефе, а также в случае опасности зажора шуги в нижнем бьефе. При сбросе шуги и льда в нижний бьеф следует предусматривать также пропуск необходимых расходов, предотвращающих образование зажоров.

Водозаборные сооружения должны обеспечивать необходимое осветление забираемой воды. Для этого необходимо предусматривать в составе гидроузла наносоперехватывающие и наносоулавливающие сооружения и устройства – отстойники, гравиеловки, песколловки.

### *7.1.1.2. Условия забора воды из водотоков*

Условия забора воды из водотока определяются водным, ледотермическим, гидрохимическим режимом, режимом твёрдого стока, русловыми процессами, результатом которых являются русловые деформации. В отношении водного режима каждая река в выбранном створе характеризуется следующими данными, используемыми при проектировании водозаборов: 1) изменением расхода воды в течение года (гидрографом реки); 2) графиком связи расходов и уровней воды (кривая  $Q = f(H)$ ); 3) графиком уровней воды в данном створе; 4) графиком связи уровней в различных створах; 5) продолжительностью стояния уровней воды; 6) водностью реки и твёрдым стоком.

Изменение уровня воды в течение года вместе с гидрографом отражает особенности питания реки. В зависимости от снегового, дождевого, ледникового, озерного, подземного питания различают гидрографы только с одним весенним пиком подъема уровня, со многими пиками в зависимости от выпадения дождевых ливней, с одним продолжительным летним подъемом уровня воды, соответствующим таянию ледников, и с практически одинаковым уровнем при питании реки из озер. Графики связи расходов и уровней воды  $Q = f(H)$  и  $H = f(Q)$  являются важнейшими показателями водности и уровня режима реки. Однако при использовании этих графиков необходимо учитывать их различие для открытого и закрытого льдом русла, различать фазы подъема и спада уровней, учитывать возможность зашугованности и деформации русла [69, 83].

Графики высоких и низких уровней воды в данном створе с показанием отметок ледостава и ледохода, зажорных и других уровней являются полезными, особенно если на них указаны основные отметки дна русла, верха и низа окон проектируемого водозабора, отметки верховой стенки и отражателя самопромывающегося ковша (рис. 7.1). Такие графики определяют вертикальные габариты водозаборов и нагляд-

но демонстрируют все возможные осложнения при их будущей эксплуатации [69].

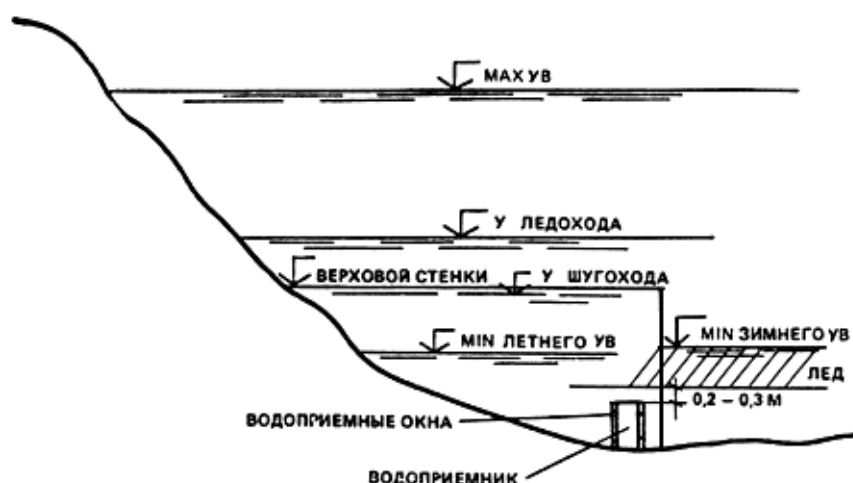


Рис. 7.1. Характеристика уровня воды в створе водозабора [69]

Водность реки характеризуется средними, максимальным и минимальным расходами воды. Для целей водоснабжения расчётными являются минимальные расходы  $Q_{\min}$  различной обеспеченности.

В русловом процессе реки выделяют обратимые и необратимые деформации. К первым относятся повторяющиеся изменения русла при прохождении по нему песчаных гряд, размывы плесовых ложбин и отложения наносов на перекатах в половодье, а в межень – деформации противоположного знака, сползание излучин или их разворот в плане. К необратимым деформациям относятся очень медленно происходящие (вековые) изменения, трудно преодолеваемые рекой природные факторы, а также изменения, связанные с возводимыми в реке инженерными сооружениями [69]. Характеристика русловых процессов и методики оценки русловых деформаций приведены в [16, 83, 111]. С особенностями расчёта ледотермического и гидрохимического режимов рек можно ознакомиться в [6, 68, 83].

Согласно [69], надёжность забора воды водозаборными сооружениями, как свидетельствует опыт их эксплуатации, определяется в первую очередь совокупностью топографических, геологических, гидрологических, гидроморфологических, гидротермических и других факторов и процессов или местных условий избранного участка водотока. Взаимодействие упомянутых факторов и процессов способствует неодновременности, неоднородности и нестационарности русловых процессов – образования ледостава, распределения наносов, шугольда, мусора и молоди рыб по глубине и по длине водотока.

Таблица 7.2

## Условия забора воды из поверхностных источников [69]

		Гидрологические условия	
Условия забора воды	мутность, устойчивость берегов и ложа	шуга и лед	другие факторы
Легкие	Средняя мутность $\leq 500$ мг/дм <sup>3</sup> . Ложе и берега устойчивые	Отсутствие внутриводного ледообразования. Ледостав толщиной 0,8 м умеренной мощности, устойчивый	Отсутствие обрастателей, водорослей, малое количество загрязнений и сора
Средние	Средняя за паводок мутность $\leq 1500$ мг/дм <sup>3</sup> . Русло и берега устойчивые с сезонными деформациями $\pm 0,3$ м	Наличие внутриводного ледообразования, прекращающегося с установлением ледостава обычно без шугозаполнения русла и образования шугозажоров. Ледостав устойчивый мощностью 1,2 м, формирующийся с полыньями	Наличие сора, водорослей, обрастателей и загрязнений в количествах, не вызывающих помехи в работе водозабора. Лесосплав молевой и плотами. Судоходство
Тяжелые	Средняя мутность $\leq 5000$ мг/дм <sup>3</sup> . Русло подвижное с перестроением берегов и ложа, вызывающим изменение отметок до 1...2 м	Неоднократно формирующийся ледяной покров с шугоходами и шугозаполнением русла при ледоставе до 60...70 % сечения водотока. В отдельные годы с образованием шугозажоров в предледоставные периоды и ледяных затворов весной. Участки нижнего бьефа ГЭС в зоне неустойчивого ледяного покрова	То же, но в количествах, затрудняющих работу водозабора и сооружений водопровода
Очень тяжелые	Средняя мутность $> 5000$ мг/дм <sup>3</sup> . Русло неустойчивое, систематически или случайно изменяющее свою форму. Наличие или вероятность оползневых явлений	Формирование ледяного покрова только при шугозажорах, вызывающих подпор; транзит шуги под ледяным покровом в течение большей части зимы. Возможность наледей и перемерзания русла. Ледоход с заторами и большими навалами льда на берега	То же



Местные условия избранного участка водотока могут изменяться вследствие: 1) последующей деформации ложа и берегов водотока или его меандрирования; 2) неоправданного или необоснованного размещения и компоновки конструктивных элементов водозабора в зоне затопления; 3) изъятия или свала в водоток твердого стока в процессе дноуглубительных работ; 4) строительства прочих инженерных сооружений (мостовых переходов, портов, лесотоварных бирж и т. д.) в значительной удаленности от створа водозабора; 5) сброса в водоток более теплой или загрязненной воды на вышерасположенном участке, а также других факторов.

Условия забора воды из водотоков определяются в зависимости от устойчивости ложа и берегов или русловых процессов, шуголедовых режимов, засоренности источника и других показателей, приведенных в табл. 7.2. Общая характеристика условий забора воды определяется по наиболее тяжелому виду затруднений.

#### *7.1.1.3. Условия забора воды из водоёмов*

Водоёмам, особенно водохранилищам, в отличие от водотоков свойственны следующие особенности [69]: 1) своеобразное колебание уровня воды в течение суток, сезона и года, часто изменяющееся в пределах нескольких метров; 2) периодическое наличие волнения на поверхности воды; 3) сложное сочетание стоковых с ветроволновыми, вдольбереговыми, компенсационными, градиентными и другими течениями, возбуждаемыми волнением; 4) своеобразная динамика прибрежных зон, характеризующаяся интенсивной переработкой берега и прибрежного склона на одних участках и аккумуляцией продуктов этой переработки на других; 5) вдольбереговая и поперечная миграция наносов, обусловленная местными особенностями избранного участка водоема; 6) возможность интенсивного заиления избранного участка водоема, особенно в устьях водотоков, бухтах или заливах, примыкающих к берегам и прибрежным склонам, сложенных из несвязных грунтов; 7) нестационарное качество воды по мутности, температуре, минерализации, содержанию планктона, мусора, кислорода и др.; 8) появление в прибрежных зонах интенсивных сосредоточенных вдольбереговых, градиентных, инерционных и других течений, транспортирующих массы воды с большим содержанием наносов, планктона, мусора; 9) местное переохлаждение воды в предледоставные периоды; 10) возможность перемещения вдольбереговыми течениями на значительные расстояния повышенных концентраций сточных вод с выше- и нижерасположенных участков водоема; 11) нестационарные по времени направление и величины скоростей стоковых, а также других разновидностей течений, воз-

буждаемых ветром и волнением; 12) наличие стратификации воды, обусловленной непостоянством по глубине температур, солености и мутности; 13) возможность образования над водоприемником вихревого водоворота-воронки, способствующего интенсивному захвату в него поверхностных слоев воды; 14) чрезмерно повышенное содержание в воде, на отдельных участках наветренного берега планктона, мусора и отмершей водной растительности; 15) более интенсивное развитие биообрастателей (дрейсены, мидии и др.); 16) возможность интенсивного зарастания водоема растительностью на участках прибрежных склонов на озерах и водохранилищах, укрытых от волн высотой  $\geq 0,75$  м, а также морей на глубине до 11 м независимо от параметров волн; 17) периодические сгонные и нагонные явления или спад и подъем уровня воды, величины которых определяются местными топографическими, метеорологическими и гидрологическими особенностями избранного участка водоема.

В целом гидрологические, гидроморфологические, гидротермические, гидробиологические и прочие процессы, развивающиеся в водоемах, существенно отличаются от аналогичных процессов в условиях водотоков. В большинстве случаев они индивидуальны, поскольку обусловлены в первую очередь местными топографическими, метеорологическими, геологическими и другими особенностями избранного участка водоема. Соответственно, надёжность забора воды заданного расхода и качества определяется в первую очередь местными условиями избранного участка водоема.

Местные условия избранного участка водоема могут измеряться вследствие последующей переработки берегов и прибрежных склонов, аккумуляции продуктов переработки, строительства инженерных сооружений в пределах прибрежной зоны, усиления биологической активности и других факторов. Основными факторами, определяющими условия отбора воды, являются сосредоточенные течения, периодически появляющиеся в прибрежных зонах водоема. Местные условия избранного участка водоема подразделяют на легкие, средние, тяжелые и очень тяжелые. Основные характеристики этих условий приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

## Условия забора воды из поверхностных источников [69]

Условия забора воды	Местные условия избранного или заданного участка водоема		другие факторы
	устойчивость берегов и прибрежных склонов; мутность воды, мг/л; аккумуляция наносов	шуга и лед	
Легкие	Берега, прибрежные склоны и ложе водоема устойчивы; Средняя мутность $\leq 500$ мг/дм <sup>3</sup>	Отсутствие внутриводного ледообразования, ледостав устойчивый	Отсутствие в водоеме обрастателей (ракушек), водорослей, малое количество загрязнений и сора
Средние	Средняя мутность $\leq 1500$ мг/дм <sup>3</sup> , берег и прибрежный склон устойчивы, периодическая деформация склона $\pm 0,5$ м, вдольбереговая миграция	Ледостав устойчивый, мощность до 1,2 м, местное переохлаждение воды в предледоставный период, не вызывающие перебоев в работе водозабора	Наличие сора, водорослей, обрастателей и загрязнений в количествах, не вызывающих помехи в работе водозабора
Тяжелые	Средняя мутность $\leq 5000$ мг/дм <sup>3</sup> , значительная переработка берега и прибрежного склона с вдольбереговой миграцией наносов	Ледостав не устойчивый, местное переохлаждение воды в предледоставные периоды, вызывающие перебои в работе водозабора. Навалы и торосение льда в прибрежной зоне	Наличие сора, водорослей, обрастателей и других загрязнений в количествах, затрудняющих работу водозабора и сооружений водопровода
Очень тяжелые	Средняя мутность $> 5000$ мг/дм <sup>3</sup> , интенсивная переработка берега и прибрежного склона с вдольбереговой и поперечной миграцией наносов. Наличие или возможность оползневых явлений	Полное переохлаждение воды в прибрежной зоне. Навалы и торосение льда с заполнением прибрежной зоны шугольдом	То же, но с чрезмерно высоким содержанием водорослей и планктона, приводящим к необходимости прекращения водозабора

#### *7.1.1.4. Классификация, категории и требования к водозаборным сооружениям из поверхностных источников*

Водозаборы из поверхностных источников различают: 1) по виду водоисточника – из водотоков (равнинных, предгорных и горных рек и каналов), из водоемов (морей, озер, водохранилищ и водохранилищ-охладителей); 2) назначению – хозяйственно-питьевые, промышленные, ирригационные, теплоэнергетические и др.; 3) категории обеспеченности подачи воды; 4) компоновке его основных элементов – совмещенные (компонуются в одном сооружении) и отдельные (комплекс сооружений); 5) месту расположения водоприемника – береговые, русловые, выносные (на водоемах); 6) типу или схеме водозабора – береговая насосная станция с самотечными или сифонными водоводами и водоприемниками, вынесенными в водоисточник (крюк), с водоприемным ковшом (ковшовые), с открытым или огражденным подводным каналом, фильтрующие, инфильтрационные, комбинированные и др.; 7) способу приема воды в водоприемник – с верхним, боковым, нижним, лобовым и низовым приемом воды; 8) условиям приема воды в водоприемник – поверхностный, глубинный или селективный (послойный) и донный; 9) положению водоприемника – незатопленный, временно затопляемый и затопленный; 10) материалу, из которого изготавливаются водоприемники – железобетонные, бетонные, металлические, деревянные и др.; 11) конструктивными особенностями водоприемника – с вихревой камерой, щелевые, ряжевые, раструбные, трубчатые, зонтичные и др.; 12) степени воздействия на природные условия водоисточника – активные и пассивные; 13) характеру подвижности – стационарные, плавучие и фуникулерные; 14) сроку эксплуатации – постоянные и временные.

При необходимости увеличения глубин воды и регулирования стока устраивают приплотинные водоприемники, которые могут быть как в теле плотины, так и за пределами ее. Водозаборы по обеспеченности подачи воды подразделяют на три категории (табл. 7.3).

Класс сооружений, устанавливаемый в зависимости от категории обеспеченности подачи воды, можно определить по табл. 7.4. Класс водоподъемных и водохранилищных плотин, входящих в состав водозаборного гидроузла, обычно принимается на класс ниже водозабора.

Для сооружений принимаются соответствующие коэффициенты надежности, учитываемые в расчетах прочности, устойчивости и т. п. в зависимости от класса. Сооружения, входящие в комплекс водозабора, должны включаться в проект в зависимости от производительности, категории обеспеченности подачи воды, гидрологической характеристики водоисточника с учетом максимальных и минимальных уровней воды

(табл. 7.5), а также требований органов санитарно-эпидемиологической службы по регулированию использования и охраны вод, охраны рыбных запасов и водного транспорта.

Таблица 7.4

*Условия забора воды из поверхностных источников [69]*

Категория водозабора	Класс сооружений, входящих в комплекс водозабора	
	Основные	Второстепенные
I	I	II
II	II	III
III	III	IV

*Примечание.* К основным следует относить сооружения, при частичном разрушении которых водозабор не обеспечит расчетную подачу воды потребителям (водоприемные устройства, самотечные и сифонные водоводы, насосные станции); к второстепенным – сооружения, частичное разрушение которых не приведет к снижению подачи воды потребителям (запасные водоприемные устройства, ограждающие элементы водоприемных ковшей, берегоукрепление и др.)

Таблица 7.5

*Условия забора воды из поверхностных источников [69]*

Категория водозаборов	Режим подачи воды
I	Допускается снижение подачи воды на хозяйственно-питьевые нужды не более 30 % и на производственные нужды до предела, устанавливаемого аварийным графиком; длительность снижения подачи не свыше трех сут. Перерыв в подаче воды или снижение подачи ниже указанного предела допускается на время выключения поврежденных и включения резервных элементов, но не более чем на 10 мин
II	Снижение подачи воды допускается в тех же пределах, что и при I категории; длительность снижения подачи не свыше 15 сут. Перерыв в подаче воды или снижение подачи ниже указанного предела допускается на время выключения поврежденных и включения резервных элементов или проведения ремонта, но не более чем на 6 ч
III	Допускается снижение подачи воды в тех же пределах, что и при I категории; длительность снижения подачи не свыше 15 сут. Перерыв или снижение подачи ниже указанного предела допускается на время проведения ремонта, но не более чем на 24 ч

Таблица 7.6

*Обеспеченности расчётных уровней воды в поверхностных водных объектах по категориям водозаборов [69]*

Категория водозаборов	Обеспеченность расчётных уровней воды в поверхностных источниках, %	
	максимальных	минимальных
I	1	97
II	2	95
III	3	90

Схема водозабора и тип водоприемных устройств принимаются по табл. 7.6 в зависимости от требуемой категории обеспеченности подачи воды и сложности природных условий ее забора. Повышение категории водозабора с затопленными водоприемниками на единицу допускается в случаях: 1) размещения водоприемников в затопляемом, самопромывающемся водоприемном ковше; 2) изыскания мероприятий, исключающих проникновение течений, выходящих из прибойной зоны водоема к месту расположения водоприемных устройств; 3) подвода к водоприемным отверстиям теплой воды в количестве не менее 20 % забираемого расхода и применения специальных наносозащитных устройств; 4) обеспечения надежной системы обратной промывки сороудерживающих решеток, рыбозаградительных устройств водоприемников и самотечных водоводов.

Таблица 7.7

*Тип водоприёмных устройств в различных условиях забора воды [69]*

Тип водоприемных устройств	Категория водозаборных сооружений при природных условиях забора воды								
	Легкие условия			Средние условия			Тяжелые условия		
	Схема водозабора								
	а	б	в	а	б	в	а	Б	в
1. Береговые незатопляемые водоприемники с водоприемными отверстиями, всегда доступными для обслуживания с необходимыми ограждающими и вспомогательными сооружениями и устройствами	I	–	–	I	–	–	II	I	I
2. Затопленные водоприемники всех типов, удаленные от берега, практически недоступные в отдельные периоды года	I	–	–	II	I	–	III	II	I
3. Нестационарные водоприемные устройства типа:									
плавучего	II	I	–	III	III	II	–	–	–
фуникулерного	III	II	–	–	–	–	–	–	–

*Примечания:* 1 – таблица составлена для водозаборов, устраиваемых по трем схемам: схема «а» – в одном створе; схема «б» – то же, но при нескольких водоприемниках, снабженных средствами борьбы с шугой, наносами и другими затруднениями, возникающими при заборе воды; схема «в» – в двух створах, удаленных на расстояние, исключающее возможность одновременного перерыва в заборе воды; 2 – в водозаборных сооружениях I и II категорий следует предусматривать секционирование водоприемной части.

Выбор схемы и компоновки водозаборного сооружения в тяжелых и очень тяжелых местных условиях следует осуществлять на основе лабораторных и натурных исследований. Использование пассивных водозаборных сооружений или таких компоновок и конструктивных элементов, которые не нарушают или сводят до минимума нарушение бытового режима водоисточника, в ряде случаев позволяет в тяжелых и даже очень тяжелых условиях забора воды обеспечить их высокую категорию. Так, при интенсивной переработке берегов, прибрежных склонов и вдольбереговых наносов вынос насосной станции за пределы ожидаемой переработки (без устройства берегозащиты) и размещение водоприемников вне зоны действия сосредоточенных течений, выходящих из прибойных зон, позволяют обеспечить водозабор I категории. В свою очередь использование активных водозаборных сооружений или таких компоновок и конструктивных элементов (ковшей, порогов, шпор, дамб, открьлков и др.), которые позволяют улучшить местные условия забора воды (более ранний ледостав, отброс от места водоотбора в водоисточник масс воды с повышенным содержанием наносов, сора, шугольда и др.), дает возможность повысить их категорию.

Конструкция водозабора должна: 1) обеспечивать забор из водоисточника расчетного расхода воды и подачу его потребителю; 2) защищать систему водоснабжения от попадания в нее сора, планктона, наносов, ракушки, шугольда и пр.; 3) обеспечивать защиту молоди рыб от гибели и травмирования, пропуск проходных рыб к нерестилищам на водоисточниках рыбохозяйственного назначения; 4) быть прочной, устойчивой и долговечной.

Водоприемные устройства водозабора должны сохранять работоспособность в условиях возникновения возможных осложнений, вызванных: 1) снижением глубин или расходов воды в водоисточнике; 2) образованием в потоке внутриводного льда и шуги, шугозаполнением русла, а также транспортированием потоком наносов, сора, карчей, топляков и т. п.; 3) судоходством, лесосплавом, регулированием стока на ГЭС; 4) отбором воды для других целей; 5) захватом загрязнений водоема; 6) переформированием русла или побережья водоема; 7) волнением, вдольбереговыми перемещениями наносов, нагоном сора и льда; 8) развитием ракушки, планктона, захватом водорослей; 9) развитием или деградацией границы вечномерзлых грунтов, наледообразованием, заторами, торошением и навалами льда.

Эффективность работы водоприемных отверстий, оборудованных сороудерживающими решетками, фильтрующими кассетами или рыбозащитными сетками, зависит от скорости втекания воды в них, их расположения относительно направления течения и уровня воды в водо-

источнике, а также от наличия у отверстий козырьков, порогов, ребер и других элементов. Наибольшее распространение получили водоприемники, водоприемные отверстия которых расположены вертикально. Применяют также водоприемники с наклонно и горизонтально расположенными отверстиями с поступлением воды сверху вниз и в обратном направлении.

В условиях мелководных зон водоемов при заборе через горизонтально расположенные отверстия с поступлением воды сверху вниз бывает трудно избавляться от появления воронок и вихрей, захвата переохлажденных в предледоставные периоды или нагретых и засоренных планктоном поверхностных слоев воды. Забор воды в вертикально расположенные отверстия, особенно в снабженные горизонтальными козырьками, лишен этих недостатков и наиболее удобен для селективного водоотбора, не нарушающего температурную стратификацию воды. Горизонтально расположенные отверстия с поступлением воды снизу вверх усиливают забор воды из придонных слоев и создают наилучшие условия для удаления засорений с решеток.

Для вертикально расположенных водоприемных отверстий необходимо различать схемы бокового, низового (против направления течения речного потока), лобового (по направлению течения речного потока) и промежуточную схему забора воды, характеризующуюся углом отвода  $\varphi$ ; эти схемы следует рассматривать для промываемого и непромываемого порогов водоприемных отверстий. Горизонтально расположенные в речном потоке отверстия могут быть приподнятыми над дном с поступлением воды или сверху вниз, или снизу вверх и донными, т. е. с поступлением воды только сверху вниз.

Отверстия для приема воды находятся в разных частях толщи набегающего потока. Различно ориентированные отверстия по-разному засоряются плавающим в воде сором, поверхностной и глубинной шугой и донными наносами. Это важное обстоятельство требует учета при проектировании водоприемников. При лобовом заборе воды в водоприемники обычно водоприемные отверстия забиваются сором и глубинной шугой, а при низовом заборе с непромываемым порогом – донными наносами. Низовой отбор с промываемым порогом оказывается наиболее эффективным, так как обеспечивает наилучшие условия для транзита по руслу шуги и наносов. Донный забор воды, который применяют при очень малых глубинах потока, всегда оказывается вынужденным.

Наиболее распространен боковой прием воды, при котором могут быть созданы благоприятные условия для ее забора. Для обеспечения хорошего обтекания водоприемника необходимо очерчивать его лобовую грань по эллипсу с соотношением полуосей 1: (1,5–2) или выпол-



нять ее полигональной, вписывая отдельные прямые части в тот же эллипс. В схеме бокового забора на равномерность втекания воды в отверстие большое влияние оказывает конструкция сороудерживающей решетки. Втекание воды в отверстия оказывается весьма неравномерным в случаях установки в них решеток с круглыми вертикальными стержнями и горизонтальными стержнями любой формы. Если вертикальные стержни решетки выполнены из полос, а ширина стержней не меньше просвета между ними, решетка становится своеобразным струенаправляющим аппаратом, который создает по всей ширине водоприемного отверстия вполне равномерное втекание воды.

### ***7.1.2. Водозаборы из подземных источников***

Сооружения для забора подземных вод проектируются с аналогичными целями, что и в случае забора поверхностных вод. Выбор типа и схемы размещения водозаборных сооружений производится исходя из геологических, гидрогеологических и санитарных условий района размещения сооружения. В водозаборах подземных вод применяются следующие водоприемные сооружения: водозаборные скважины, шахтные колодцы, горизонтальные водозаборы, комбинированные водозаборы, лучевые водозаборы, каптажи родников [100].

#### ***7.1.2.1. Водозаборные скважины***

Согласно [100], в проектах скважин должен быть указан способ бурения и определены конструкции скважины, ее глубина, диаметры колонн труб, тип водоприемной части, водоподъемника и оголовка скважины, а также порядок их опробования.

Выбор способа бурения скважин осуществляют в зависимости от местных гидрогеологических условий, глубины и диаметра скважин. Для крепления скважин используют обсадные стальные муфтовые и электросварные трубы (для крепления скважин глубиной до 250 м при свободной посадке обсадных труб допускается применение неметаллических труб с обязательной затрубной цементацией). В конструкциях скважин колонны обсадных труб должны приниматься телескопическими. Разница между диаметрами предыдущей и последующей колонн обсадных труб должна быть не менее 50 мм. В сложных гидрогеологических условиях для перекрытия не закрепленных направляющей колонной водоносных пластов или пород, склонных к обвалам и поглощению промывочной жидкости, в конструкции скважины надлежит предусматривать установку дополнительных колонн обсадных труб. Колонны обсадных труб для временного (при бурении) закрепления стенок скважи-

ны должны извлекаться. В колоннах обсадных труб для постоянной эксплуатации скважин должно производиться извлечение свободного конца труб, при этом верхний обрез обсадной трубы, остающейся в скважине, должен находиться выше башмака предыдущей колонны не менее чем на 3 м. Кольцевой зазор между оставшейся частью колонны и предыдущей колонной обсадных труб должен быть зацементирован или заделан путем установки сальника.

Для предотвращения проникания поверхностных загрязнений и воды неиспользуемых водоносных пластов должна предусматриваться изоляция скважин. Качество изоляции должно проверяться откачкой или наливом воды при бурении ударным способом и нагнетанием воды под давлением при роторном бурении, а также геофизическими методами. Производят цементацию водозаборных скважин. При наличии агрессивных вод в используемых и гидравлически связанных с ними водоносных пластах должна предусматриваться антикоррозионная защита обсадных труб или применяться трубы из материалов, стойких к коррозии. В конструкции скважины необходимо предусматривать возможность проведения замеров дебита, уровня и отбора проб воды, а также производства ремонтно-восстановительных работ при применении импульсных, реагентных и комбинированных методов регенерации при эксплуатации скважин. Диаметр эксплуатационной колонны труб в скважинах принимают в зависимости от способа установки насоса. При установке электродвигателя над скважиной диаметр колонны принимают на 50 мм больше номинального диаметра насоса, при установке погружного электродвигателя – принимают равным номинальному диаметру насоса.

В зависимости от местных условий и оборудования устье скважины следует, как правило, располагать в наземном павильоне или подземной камере. Габариты павильона и подземной камеры в плане следует принимать из условия размещения в нем электродвигателя, электрооборудования и контрольно-измерительных приборов (КИП). Высоту наземного павильона и подземной камеры надлежит принимать в зависимости от габаритов оборудования, но не менее 2,4 м. Верхняя часть эксплуатационной колонны труб должна выступать над полом не менее чем на 0,5 м. Конструкция оголовка скважины должна обеспечивать полную герметизацию, исключаящую проникание в межтрубное и затрубное пространства скважины поверхностной воды и загрязнений.

Монтаж и демонтаж секций скважинных насосов следует предусматривать через люки, располагаемые над устьем скважины, с применением средств механизации. Количество резервных скважин следует принимать по табл. 7.8.

Таблица 7.8

## Количество резервных скважин на водозаборе [100]

Количество рабочих скважин	Количество резервных скважин на водозаборе при категории		
	I	II	III
От 1 до 4	1	1	1
От 5 до 12	2	1	–
13 и более	20 %	10 %	–

При этом категория централизованных систем водоснабжения по степени обеспеченности подачи воды назначается из следующих соображений: I – допускается снижение подачи воды на хозяйственно-питьевые нужды не более 30 % расчетного расхода и на производственные нужды до предела, устанавливаемого аварийным графиком работы предприятий; длительность снижения подачи не должна превышать 3 сут. Перерыв в подаче воды или снижение подачи ниже указанного предела допускаются на время выключения поврежденных и включения резервных элементов системы (оборудования, арматуры, сооружений, трубопроводов и др.), но не более чем на 10 мин; II – величина допускаемого снижения подачи воды та же, что при I категории; длительность снижения подачи не должна превышать 10 сут. Перерыв в подаче воды или снижение подачи ниже указанного предела допускаются на время выключения поврежденных и включения резервных элементов или проведения ремонта, но не более чем на 6 ч; III – величина допускаемого снижения подачи воды та же, что при I категории; длительность снижения подачи не должна превышать 15 сут. Перерыв в подаче воды или снижение подачи ниже указанного предела допускается на время проведения ремонта, но не более чем на 24 ч.

Существующие на участке водозабора скважины, дальнейшее использование которых невозможно, подлежат ликвидации путем тампонажа. Фильтры в скважинах устанавливаются в рыхлых, неустойчивых скальных и полускальных породах. Конструкцию и размеры фильтра следует принимать в зависимости от гидрогеологических условий, дебита и режима эксплуатации. Конечный диаметр обсадной трубы при ударном бурении должен быть больше наружного диаметра фильтра не менее чем на 50 мм, а при обсыпке фильтра гравием – не менее чем на 100 мм. При роторном способе бурения без крепления стенок трубами конечный диаметр скважин должен быть больше наружного диаметра фильтра не менее чем на 100 мм. Длину рабочей части фильтра в напорных водоносных пластах мощностью до 10 м следует принимать равной мощности пласта; в безнапорных – мощности пласта за вычетом эксплуатационного понижения уровня воды в скважине (фильтр, как пра-

вило, должен быть затоплен). В водоносных пластах мощностью более 10 м длину рабочей части фильтра надлежит определять с учетом водопроницаемости пород, производительности скважин и конструкции фильтра. Рабочую часть фильтра следует устанавливать на расстоянии от кровли и подошвы водоносного пласта не менее 0,5...1,0 м.

При использовании нескольких водоносных пластов рабочие части фильтров устанавливают в каждом водоносном пласте и соединяют между собой глухими трубами (перекрывающими слабопроницаемые слои). Верхняя часть надфильтровой трубы должна быть выше башмака обсадной колонны не менее чем на 3 м при глубине скважины до 50 м и не менее чем на 5 м при глубине скважины более 50 м; при этом между обсадной колонной и надфильтровой трубой при необходимости должен быть установлен сальник. Длину отстойника следует принимать не более 2 м. Бесфильтровые конструкции скважин для забора подземных вод из рыхлых песчаных отложений надлежит принимать при условии, когда над ними залегают устойчивые породы. После окончания бурения скважин и оборудования их фильтрами необходимо предусматривать прокачку, а при роторном бурении с глинистым раствором – разглинизацию до полного осветления воды. Для установления соответствия фактического дебита водозаборных скважин принятому в проекте необходимо предусматривать их опробование откачками.

#### *7.1.2.2. Шахтные колодцы*

Шахтные колодцы следует применять, как правило, в первых от поверхности безнапорных водоносных пластах, сложенных рыхлыми породами и залегающих на глубине до 30 м. При мощности водоносного пласта до 3 м следует предусматривать шахтные колодцы совершенного типа с вскрытием всей мощности пласта; при большей мощности допускаются совершенные и несовершенные колодцы с вскрытием части пласта. При расположении водоприемной части в песчаных грунтах на дне колодца необходимо предусматривать обратный песчано-гравийный фильтр или фильтр из пористого бетона, а в стенках водоприемной части колодцев – фильтры из пористого бетона или гравийные.

Обратный фильтр принимают из нескольких слоев песка и гравия толщиной по 0,1...0,15 м каждый, общей толщиной 0,4...0,6 м с укладкой в нижнюю часть фильтра мелких, а в верхнюю – крупных фракций. Верх шахтных колодцев должен быть выше поверхности земли не менее чем на 0,8 м. При этом вокруг колодца должна предусматриваться отмостка шириной 1...2 м с уклоном 0,1 от колодца; вокруг колодцев, подающих воду для хозяйственно-питьевых нужд, кроме того, следует предусматривать устройство замка из глины или жирного суглинка глу-

биной 1,5...2,0 м и шириной 0,5 м. В колодцах необходимо предусматривать вентиляционную трубу, выведенную выше поверхности земли не менее чем на 2 м. Отверстие вентиляционной трубы должно защищаться колпаком с сеткой.

### *7.1.2.3. Горизонтальные водозаборы*

Горизонтальные водозаборы следует предусматривать, как правило, на глубине до 8 м в безнапорных водоносных пластах, преимущественно вблизи поверхностных водотоков. Они могут проектироваться в виде каменно-щебеночной дрены, трубчатой дрены, водосборной галереи или водосборной штольни. Водозаборы в виде каменно-щебеночной дрены рекомендуется предусматривать для систем временного водоснабжения. Трубчатые дрены проектируют на глубине до 5...8 м для водозаборов II и III категорий. Для водозаборов I и II категорий должны приниматься, как правило, водосборные галереи. Водозаборы в виде штольни следует принимать в соответствующих орографических условиях. Для исключения выноса частиц породы из водоносного пласта при проектировании водоприемной части горизонтальных водозаборов должен предусматриваться обратный фильтр из двух-трех слоев.

Механический состав отдельных слоев обратного фильтра следует определять расчетом. Толщина отдельных слоев фильтра должна быть не менее 15 см. Для водозабора в виде каменно-щебеночной дрены прием воды следует предусматривать через щебеночную призму размером 30 × 30 или 50 × 50 см, уложенную на дно траншеи, с устройством обратного фильтра. Каменно-щебеночную дренажную трубу надлежит принимать с уклоном 0,01...0,05 в сторону водосборного колодца. Водоприемную часть водозаборов из трубчатых дрен следует принимать из керамических, асбестоцементных, железобетонных и пластмассовых труб с круглыми или щелевыми отверстиями с боков и в верхней части трубы; нижняя часть трубы (не более 1/3 по высоте) должна быть без отверстий. Минимальный диаметр труб надлежит принимать 150 мм. Применение металлических перфорированных труб допускается при обосновании.

Определение диаметров трубопроводов горизонтальных водозаборов следует производить для периода низкого стояния уровня грунтовых вод, расчетное наполнение принимать 0,5 диаметра трубы. Уклоны труб в сторону водосборного колодца должны быть не менее: 0,007 – при диаметре 150 мм; 0,005 – 200 мм; 0,004 – 250 мм; 0,003 – 300 мм; 0,002 – 400 мм; 0,001 – 500 мм. Скорость течения воды в трубах должна приниматься не менее 0,7 м/с.

Водоприемные галереи принимают из сборного железобетона с щелевыми отверстиями или окнами с козырьками. Под железобетонными звеньями галереи должно предусматриваться основание, исключающее осадку их относительно друг друга. С боков галереи в пределах ее водоприемной части следует предусматривать устройство обратного фильтра. Горизонтальные водозаборы должны быть защищены от попадания в них поверхностных вод.

Для наблюдения за работой трубчатых и галерейных водозаборов, их вентиляции и ремонта надлежит принимать смотровые колодцы, расстояние между которыми должно быть не более 50 м для трубчатых водозаборов диаметром от 150 до 500 мм и 75 м – при диаметре более 500 мм; для галерейных водозаборов – 100...150 м. Смотровые колодцы следует предусматривать также в местах изменения направления водоприемной части в плане и вертикальной плоскости. Смотровые колодцы принимают диаметром 1 м; верх колодцев должен возвышаться не менее чем на 0,2 м над поверхностью земли; вокруг колодцев должна быть сделана водонепроницаемая отмостка шириной не менее 1 м и глиняный замок; колодцы должны быть оборудованы вентиляционными трубами. Насосные станции горизонтальных водозаборов следует, как правило, совмещать с водосборным колодцем.

Комбинированные горизонтальные водозаборы необходимо принимать в двухпластовых системах с верхним безнапорным и нижним напорным водоносными пластами. Водозабор следует предусматривать в виде горизонтальной трубчатой дрены, каптирующей верхний безнапорный пласт, к которой снизу или сбоку подключены патрубки фильтровых колонн вертикальных скважин-усилителей, заложенных в нижнем пласте.

#### *7.1.2.4. Лучевые водозаборы*

Лучевые водозаборы предусматривают в водоносных пластах, кровля которых расположена от поверхности земли на глубине не более 15...20 м и мощность водоносного пласта не превышает 20 м. Лучевые водозаборы в галечниковых грунтах при крупности фракций  $D \geq 70$  мм, при наличии в водоносных породах включений валунов в количестве более 10 % и в илистых мелкозернистых породах применять не рекомендуется. В неоднородных или мощных однородных водоносных пластах следует применять многоярусные лучевые водозаборы с лучами, расположенными на разных отметках. Водосборный колодец при производительности водозабора до 150...200 л/с и в благоприятных гидрогеологических и гидрохимических условиях следует предусматривать односекционным; при производительности водозабора свыше 200 л/с водосборный колодец должен быть разделен на две секции.

Лучи длиной 60 м и более следует принимать телескопической конструкции с уменьшением диаметра труб. При длине лучей меньше 30 м в однородных водоносных пластах угол между лучами должен быть не менее 30°. Водоприемные лучи должны приниматься из стальных перфорированных или щелевых труб со скважностью не более 20 %; на водоприемных лучах в водосборных колодцах следует предусматривать установку задвижек.

#### 7.1.2.5. Каптаж родников

Каптажные устройства (водосборные камеры или неглубокие опускные колодцы) следует применять для захвата подземных вод из родников. Примеры каптажных устройств родников показаны на рис. 7.2.

Захват воды из восходящего родника следует осуществлять через дно каптажной камеры, из нисходящего – через отверстия в стене камеры. При каптаже родников из трещиноватых пород прием воды в каптажной камере допускается осуществлять без фильтров, а из рыхлых пород – через обратные фильтры. Каптажные камеры должны быть защищены от поверхностных загрязнений, промерзания и затопления поверхностными водами.



Родник на пер. Тихом



Родник в Университетской роще

Рис. 7.2. Примеры каптажных устройств родников г. Томска

В каптажной камере следует предусматривать переливную трубу, рассчитанную на наибольший дебит родника, с установкой на конце клапана-захлопки, вентиляционную трубу согласно и спускную трубу

диаметром не менее 100 мм. Для освобождения воды родника от взвеси каптажную камеру следует разделять переливной стенкой на два отделения: одно – для отстаивания воды с последующей очисткой его от осадка, второе – для забора воды насосом. При наличии вблизи нисходящего родника нескольких выходов воды каптажную камеру следует предусматривать с открылками.

#### *7.1.2.6. Искусственное пополнение запасов подземных вод*

Искусственное пополнение подземных вод следует принимать: 1) для увеличения производительности и обеспечения стабильной работы действующих и проектируемых водозаборов подземных вод; 2) улучшения качества инфильтруемых и отбираемых подземных вод; 3) создания сезонных запасов подземных вод; 4) охраны окружающей среды (предотвращение недопускаемого понижения уровня грунтовых вод, приводящего к гибели растительности).

Для пополнения запасов подземных вод эксплуатируемых водоносных пластов должны использоваться поверхностные и подземные воды. Пополнение запасов подземных вод следует предусматривать через инфильтрационные сооружения открытого и закрытого типов. В качестве инфильтрационных сооружений открытого типа следует применять: бассейны, естественные и искусственные понижения рельефа (овраги, балки, старицы, карьеры). Открытые инфильтрационные сооружения надлежит принимать для пополнения запасов подземных вод первого от поверхности водоносного пласта при отсутствии или малой мощности (до 3 м) покровных слабопроницаемых отложений.

При проектировании инфильтрационных бассейнов предусматривают: 1) врезку днища в хорошо фильтрующие породы на глубину не менее 0,5 м; 2) укрепление дна в месте выпуска воды и предохранение откосов от размыва; 3) устройства для регулирования и измерения расхода воды, подаваемой на инфильтрационные сооружения; 4) подъездные пути и съезды для машин и механизмов.

Ширина по дну инфильтрационных бассейнов должна быть не более 30 м, длина бассейнов – не более 500 м, слой воды – 0,7...2,5 м, количество – не менее двух. Подачу воды в бассейны следует предусматривать через разбрызгивающие устройства или каскад со свободным изливом. При устройстве бассейнов в гравийно-галечниковых отложениях с крупным заполнителем следует предусматривать загрузку дна крупнозернистым песком толщиной слоя 0,5...0,7 м. При использовании естественных понижений рельефа должна предусматриваться подготовка фильтрующей поверхности. В качестве инфильтрационных сооружений



закрытого типа следует применять скважины (поглощающие и дренажно-поглощающие) и шахтные колодцы.

При проектировании поглощающих и дренажно-поглощающих скважин и шахтных колодцев необходимо предусматривать устройства для измерения и регулирования расходов подаваемой воды и измерения динамических уровней воды в сооружениях и водоносном пласте. Конструкция инфильтрационных сооружений должна обеспечивать возможность восстановления их производительности на открытых инфильтрационных сооружениях путем механического или гидравлического съема закальматированного слоя с фильтрующей поверхности, на закрытых – методами, применяемыми для регенерации водозаборных скважин. Опорожнение и регенерация открытых инфильтрационных сооружений в период отрицательных температур не допускаются.

Выбор схемы размещения инфильтрационных сооружений, определение их количества и производительности должны производиться на основе комплексных гидрогеологических и технико-экономических расчетов с учетом назначения искусственного пополнения запасов подземных вод, схемы размещения водозаборных сооружений, качества подаваемой воды и особенностей эксплуатации инфильтрационных и водозаборных сооружений. Расстояния между инфильтрационными и водозаборными сооружениями должны приниматься на основе прогноза качества отбираемой воды. Необходимо учитывать, что при инфильтрации воды в водоносный пласт и смешении с подземными водами произойдет ее доочистка.

## **7.2. Очистные сооружения и поля орошения**

### **7.2.1. Общая характеристика методов очистки сточных вод**

Согласно [15, 109], методы очистки сточных вод можно разделить на механические, химические, физико-химические и биологические. Применение того или иного метода определяется особенностями размещения объектов, образующих стоки (в черте городов и населенных пунктов, рекреационных и природоохранных территорий, на слабозаселенных человеком территориях, например на месторождениях нефти, удаленных на десятки и сотни километров от урбанизированных территорий и др.), характером загрязнения приемника сточных вод и степенью вредности примесей, но, в соответствии с действующими природоохранными документами, в любом случае используются наилучшие технические решения, а выбранный вариант должен определяться наименьшей величиной приведенных затрат с учетом сокращения тру-

довых затрат, расхода материальных ресурсов, электроэнергии и топлива, а также исходя из санитарно-гигиенических и рыбохозяйственных требований [100].

*Механическая очистка* проводится с целью задержания нерастворенных примесей. К сооружениям механической очистки относятся *решетки, сита, песколовки, отстойники и фильтры* различных конструкций. Решетки и сита предназначены для задержания крупных загрязнений органического и минерального происхождения, песколовки – для выделения примесей минерального состава, преимущественно песка, отстойники – для задержания оседающих и плавающих загрязнений. Механическая очистка позволяет выделять из бытовых сточных вод до 60 % нерастворимых примесей и обычно предшествует стадии биологической очистки сточных вод [15].

*Химическая очистка* сточных вод включает *нейтрализацию, окисление, восстановление, реагентные методы* выделения загрязняющих веществ в виде малорастворимых и нерастворимых соединений и проводится перед их подачей в систему оборотного водоснабжения и перед спуском в водный объект или городскую канализационную сеть, либо предшествует стадии физико-химической и биологической очистки. Кроме того, химическая обработка применяется для дезинфекции или обесцвечивания стоков. При использовании окислителей наиболее часто используют хлор, гипохлорит кальция, хлорную известь, диоксид хлора, озон, технический кислород, кислород воздуха, реже – пероксид водорода, оксиды марганца, перманганат и бихромат калия [47]. В процессе химической очистки достигается уменьшение нерастворимых примесей до 95 % и растворимых – до 25 %.

*Физико-химические методы* во многих случаях применяются обычно при обработке производственных сточных вод, иногда в комплексе с методами механической и биологической очистки, и включают *коагуляцию и флокуляцию, сорбцию, ионный обмен, экстракцию, различные электрохимические методы, мембранные методы* (обратный осмос, ультрафильтрацию) и др. *Коагуляция* – это процесс укрупнения дисперсных частиц за счет их взаимодействия и объединения в агрегаты; *флокуляция* – процесс агрегации дисперсных частиц под действием высокомолекулярных соединений (флокулянтов); *сорбция* – процесс поглощения вещества из окружающей среды твердым телом или жидкостью (сорбентом) во всем объеме сорбента (абсорбция) или на его поверхности (адсорбция); *жидкостная экстракция* – процесс извлечения вещества из водного раствора в жидкую органическую фазу, не смешивающуюся с водой. *Флотация* используется для очистки стоков от ПАВ, нефтепродуктов, масел и различных волокнистых материалов. При этом

процесс очистки состоит в образовании комплексов «частицы – пузырьки воздуха», всплывании этих комплексов на поверхность жидкости с образованием пенного слоя и его последующем удалении [47]. При физико-химической очистке из сточных вод удаляются тонкодисперсные и растворенные неорганические примеси и разрушаются органические и плохо окисляемые вещества.

*Биологические методы* очистки сточных вод основаны на жизнедеятельности биоты (микроорганизмов, растений и др.), которые минерализуют и трансформируют растворенные органические соединения, являющиеся источником их питания. Сооружения биологической очистки могут быть разделены на два вида: 1) сооружения, на которых процесс биологической очистки осуществляется в условиях, близких к естественным условиям (поля фильтрации (орошения), биологические пруды) с помощью всей совокупности биотических объектов (микроорганизмов, макрофитных растений и гидробионтов); 2) сооружения с биологической очисткой в искусственно созданных условиях – в аэротенках и биофильтрах с помощью микроорганизмов [15].

Особо отметим технологию очистки сточных вод в биологических прудах с высшей водной растительностью, которая в последние годы получает достаточно широкое распространение как в странах Европейского Союза, так и в Российской Федерации, поскольку позволяет существенно снизить стоимость очистки стоков малых населенных пунктов и в труднодоступной местности при сохранении или даже увеличении ее эффективности [109].

Другое перспективное направление биологической очистки сточных вод в естественных условиях – использование *полей орошения и фильтрации*, позволяющих убрать 50...60 % загрязнений. Поля орошения отличаются от полей фильтрации тем, что на первых выращивают овощи, злаки, плодовые и декоративные деревья и кустарники, технические культуры, а поля фильтрации служат только для очистки сточных вод. При этом выделяют коммунальные и земельные поля орошения. *Коммунальные поля орошения* используют в основном для очистки сточных вод, а выращивание сельскохозяйственной продукции играет вспомогательную роль. *Земельные поля орошения* служат для полной биологической очистки сточных вод и планового выращивания сельскохозяйственной продукции [96].

*Дезинфекция сточных вод* является заключительным этапом их обработки перед сбросом в водный объект. Наибольшее распространение получил способ дезинфекции путем введения газообразного хлора. Возможно обеззараживание сточных вод озоном, с помощью бактерицидных ультрафиолетовых ламп и т. д. [15].

*Обработка осадков сточных вод*, образующихся в процессе их очистки, заключается в снижении их влажности, уменьшении объема и обеззараживании. Загрязнения, задерживаемые решетками, вывозят с территории очистных сооружений или дробятся и обрабатываются совместно с осадками из отстойников. Песок из песколовков обезвоживается на песковых площадках и также вывозится или отмывается от органических загрязнений, подсушивается и используется в планировочных работах [15, 109].

Степень очистки сточных вод необходимо определять в зависимости от местных условий и с учетом возможного использования очищенных сточных вод и поверхностного стока для производственных или сельскохозяйственных нужд. Степень очистки сточных вод, сбрасываемых в водные объекты, должна отвечать требованиям природоохранного законодательства и технологическим требованиям потребителя. Необходимо выявлять также возможность использования обезвреженных осадков сточных вод для удобрения и других целей.

Степень смешения и разбавления сточных вод с водой водного объекта следует определять согласно [60]. Методы и примеры расчёта допустимых концентраций загрязняющих веществ приведены в [83]. При невозможности обеспечить предельно допустимую концентрацию (ПДК) загрязняющих веществ в воде водного объекта с учетом эффекта очистки и степени разбавления их водой водного объекта концентрацию этих веществ, поступающих на очистные сооружения, надлежит снижать за счет устройства локальных очистных сооружений.

Количество загрязняющих воду веществ на одного жителя для определения их концентрации в бытовых сточных водах необходимо принимать по табл. 7.9. Концентрацию загрязняющих веществ надлежит определять исходя из удельного водоотведения на одного жителя.

В сточных водах необходимо учитывать содержание загрязняющих веществ в исходной водопроводной воде, а также загрязняющие вещества от сооружений по обработке осадков сточных вод, от промывных вод сооружений глубокой очистки и т. п. Расчёт сооружений для очистки производственных сточных вод и обработки их осадков следует выполнять на основании требований [102] и действующих норм строительного проектирования предприятий, зданий и сооружений соответствующих отраслей промышленности, данных научно-исследовательских институтов и опыта эксплуатации действующих сооружений. Исходные данные для проектирования развития и реконструкции существующих очистных сооружений следует принимать на основании полученных должным образом результатов контроля расхода и свойств поступающих

сточных вод за период не менее 3 лет, с учетом перспективного развития поселений и городских округов.

Таблица 7.9

*Количество загрязняющих веществ, приходящихся на одного жителя [102]*

Показатель	Количество, г/сут
Взвешенные вещества	65
БПК <sub>5</sub> неосветлённой жидкости	60
Азот общий	13
Азот аммонийных солей	10,5
Фосфор общий	2,5
Фосфор фосфатов P-PO <sub>4</sub>	1,5

*Примечания:* 1 Указанные в таблице значения удельной нагрузки от одного жителя приведены для обеспеченности 15%. 2. Количество загрязняющих веществ от населения, проживающего в неканализованных районах, допускается учитывать в размере 33% табличных значений соответственно. 3 При сбросе бытовых сточных вод промышленных предприятий в систему водоотведения поселений и городских округов количество загрязняющих веществ от эксплуатационного персонала дополнительно не учитывается. 4 Расчетные данные БПК<sub>полн</sub> допускается принимать путем пересчета данных по БПК<sub>полн</sub> с использованием коэффициента пересчета БПК<sub>5</sub> в БПК<sub>полн</sub>. Значение этого коэффициента рекомендуется принимать по результатам сравнительных лабораторных определений БПК<sub>5</sub> и БПК<sub>полн</sub> (не менее восьми определений за год, не менее двух определений в квартал). При отсутствии таких данных для сточных вод допускается принимать следующие коэффициенты пересчета БПК<sub>5</sub> и БПК<sub>полн</sub>: 1,2 – неосветленная, осветленная; 1,65 – биологически очищенная.

Расчетные общие максимальные и минимальные расходы сточных вод с учетом суточной, часовой и внутрисуточной неравномерностей следует определять по результатам компьютерного моделирования систем водоотведения, учитывающих графики притока сточных вод от зданий, жилых массивов, промышленных предприятий, протяженность и конфигурацию сетей, наличие насосных станций и т. д., либо по данным фактического графика водоподдачи при эксплуатации аналогичных объектов.

Сооружения аэробной биологической очистки (незатопленные и затопленные биофильтры, аэротенки, циклические реакторы, биореакторы других типов, биологические пруды, искусственные болотные экосистемы) следует применять как основные для очистки сточных вод от органических загрязнений, содержащих поддающиеся биохимическому разложению соединения азота и фосфора. Для производственных сточных вод и их смесей с бытовыми сточными водами допускается использование двух и более ступеней биологической очистки.

Биофильтры допускается применять как основные сооружения биологической очистки от органических загрязнений при одноступенчатой схеме или в качестве одной или нескольких ступеней для очистки от органических загрязнений и/или аммонийного азота при многоступенчатой схеме очистки.

Состав сооружений следует выбирать в зависимости от характеристики и количества сточных вод, поступающих на очистку, требуемой степени их очистки, метода обработки осадка и местных условий. Площадку очистных сооружений сточных вод надлежит располагать с подветренной стороны для господствующих ветров теплого периода года по отношению к жилой застройке и ниже населенного пункта по течению водотока.

Компоновка зданий и сооружений на площадке должна обеспечивать: 1) рациональное использование территории с учетом перспективного расширения сооружений и возможность строительства по очередям; 2) оптимальное блокирование сооружений и зданий различного назначения и минимальную протяженность внутриплощадочных коммуникаций; 3) оптимальное использование уклона местности (планировки территории) для самотечного прохождения основного потока сточных вод через сооружения с учетом всех потерь напора.

При проектировании очистных сооружений следует предусматривать: 1) устройства для равномерного распределения сточных вод и осадка между отдельными элементами сооружений, а также для отключения сооружений, каналов и трубопроводов на ремонт без нарушения режима работы комплекса, для опорожнения и промывки сооружений и коммуникаций; 2) устройства для измерения расходов сточных вод, осадка, воздуха и биогаза; 3) максимальное использование вторичных энергоресурсов (биогаза, тепла сжатого воздуха и сточных вод) для нужд станции очистки; 4) оборудование для непрерывного контроля качества поступающих и очищенных сточных вод или лабораторное оборудование для периодического контроля; 5) оптимальную степень автоматизации работы, с учетом технико-экономического обоснования, наличия квалифицированного персонала и др. [102].

### ***7.2.2. Системы канализации***

Согласно [25], канализация – это отведение бытовых, промышленных и ливневых сточных вод. Система водоотведения включает в себя канализационные сети (в том числе снегоплавильные пункты и сливные станции), насосные станции, регулирующие и аварийно-регулирующие резервуары и очистные сооружения; подразделяется на общесплавную, полураздельную и раздельную [102].

Общесплавная система канализации – это система канализации, предназначенная для совместного отведения и очистки всех видов сточных вод, включая городские и поверхностные.

Полураздельная система канализации – система коммунальной канализации, при которой устраиваются две самостоятельные уличные сети трубопроводов: одна для отведения городских сточных вод, другая – для отведения дождевого, талого и поливомоечного стока; главные коллекторы, отводящие все виды сточных вод на очистные сооружения населенного пункта, устраиваются общесплавными, и при превышении расчетных расходов часть дождевых вод через разделительные камеры сбрасывается в водоем без очистки.

Раздельная система канализации – система канализации, при которой устраиваются две или более самостоятельные канализационные сети: сеть для отведения хозяйственно-бытовых и части производственных сточных вод, допускаемых к сбросу в систему городской канализации; сеть для загрязненных производственных сточных вод, не допускаемых к совместному отведению и очистке с бытовыми сточными водами; сеть для отведения с селитебных территорий и площадок предприятий дождевого, талого и поливо-моечного стока, который перед сбросом в водоем подвергается очистке.

Проектирование систем водоотведения (канализации) поселений, городских округов должно осуществляться по ГОСТ Р 21.1101 на основании утвержденных органами местного самоуправления генеральных схем и проектов районной планировки и застройки поселений, городских округов и размещения промышленных предприятий, с учетом требований к очистке сточных вод, климатических условий, рельефа местности, геологических, гидрологических, экологических условий и других факторов. Очистку производственных, бытовых и поверхностных сточных вод поселений, городских округов допускается производить совместно или раздельно в зависимости от их характера и при условии максимального повторного использования. Проекты водоотведения объектов должны быть увязаны со схемой их водоснабжения, с обязательным рассмотрением возможности использования очищенных сточных и поверхностных вод для производственного водоснабжения и орошения (при условии согласования с санитарно-эпидемиологическими службами).

При выборе схемы водоотведения промышленных предприятий необходимо учитывать: 1) возможность сокращения объемов загрязненных сточных вод, образующихся в технологических процессах за счет внедрения безотходных и безводных производств, устройства замкнутых систем водного хозяйства, применения воздушных методов охла-

ждения и т. п.; 2) возможность локальной очистки потоков сточных вод с целью извлечения отдельных компонентов; 3) возможность последовательного использования воды в различных технологических процессах с различными требованиями к ее качеству; 4) условия выпуска производственных сточных вод в водные объекты или в централизованную систему водоотведения поселения, городского округа или другого водопользователя, которые определяются действующим природоохранным законодательством, а также нормативными правовыми актами в сфере водоснабжения и водоотведения, регулирующими отношения между организациями, осуществляющими водоснабжение и водоотведение, и их абонентами; 5) условия удаления и использования осадков и отходов, образующихся при очистке сточных вод.

Объединение потоков производственных сточных вод с различными загрязняющими веществами допускается при целесообразности их совместной очистки. Производственные сточные воды, подлежащие совместному отведению и очистке с бытовыми сточными водами поселения или городского округа, должны отвечать действующим требованиям к составу и свойствам сточных вод, принимаемых в систему водоотведения поселения или городского округа. Производственные сточные воды, не отвечающие указанным требованиям, должны подвергаться предварительной очистке.

Запрещается предусматривать сброс в водные объекты (включая подземные) неочищенных до установленных нормативов поверхностных сточных вод, организованно отводимых с территории предприятий, в том числе централизованными системами водоотведения поселений и городских округов.

При определении условий выпуска поверхностного стока с селитебных территорий и площадок предприятий в водные объекты следует руководствоваться нормативами Российской Федерации для условий сброса сточных вод. Выбор схемы отведения и очистки поверхностного стока, а также конструкции очистных сооружений определяется качественной и количественной характеристиками стока, условиями отведения и осуществляется на основании оценки технической возможности реализации того или иного варианта и сравнения технико-экономических показателей.

Места расположения объектов водоотведения и прохода коммуникаций, а также условия и места выпуска очищенных сточных вод и поверхностного стока в водные объекты необходимо согласовывать с органами местного управления, организациями, осуществляющими государственный санитарный надзор и охрану рыбных запасов, а также с другими органами, в соответствии с законодательством Российской Фе-



дерации, в т. ч. СанПиН 2.1.5.2582 и СанПиН 2.1.5.980, а места выпуска в судоходные водные объекты и моря – с соответствующими органами управления речного и морского флота.

Для обеспечения бесперебойности действия системы водоотведения следует предусматривать следующие мероприятия: 1) соответствующую надежность электроснабжения объектов канализации (два независимых источника, резервная автономная электростанция, аккумуляторные батареи и т. п.); 2) дублирование коммуникаций, устройство обводных линий и перепусков, переключения на параллельных трубопроводах и т. п.; 3) устройство аварийных (буферных) емкостей с последующей откачкой из них в нормальном режиме; 4) секционирование параллельно работающих сооружений, с числом секций, обеспечивающих необходимую и достаточную эффективность действия при отключении одной из них на ремонт или профилактику; 5) резервирование рабочего оборудования одного назначения; 6) обеспечение необходимого запаса мощности, пропускной способности, вместимости, прочности и т. п. оборудования и сооружений (определяется технико-экономическими расчетами); 7) определение пределов допускаемых снижений пропускной способности системы и/или эффективности очистки сточных вод в аварийных ситуациях (по согласованию с органами надзора). Вышеперечисленные мероприятия следует прорабатывать в ходе проектирования с учетом уровня ответственности объекта.

Санитарно-защитные зоны от канализационных сооружений до границ зданий жилой застройки, участков общественных зданий и предприятий пищевой промышленности с учетом их перспективного расширения следует принимать в соответствии с СанПиН 2.1.6.1032 и СанПиН 2.2.1/2.1.1.984, а случаи отступления от них должны согласовываться с органами санитарно-эпидемиологического надзора.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Дайте определение понятий «природообустройство», «водопользование», «гидротехническое сооружение». Приведите примеры систем природообустройства и водопользования в Российской Федерации.
2. Дайте определение понятия «водозабор». Какие источники водоснабжения вы знаете? Перечислите преимущества и недостатки водозаборов из поверхностных и подземных источников.
3. Какие необходимы гидрологические, гидрогеологические и метеорологические данные для выбора источника водоснабжения и проектирования водозаборных сооружений?

4. Как классифицируются водозаборы из поверхностных источников? Каковы состав и компоновка водозаборных сооружений из поверхностных источников?
5. Какие существуют отличия водозаборных сооружений на водотоках и водоёмах?
6. Какие методы очистки сточных вод существуют? В каких условиях применяются те или иные методы очистки? В чем преимущества и недостатки различных методов очистки сточных вод?
7. Как осуществляется водоотведение сточных вод?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное учебное пособие включает в себя широкий перечень вопросов гидрогеохимии, но оно не является исчерпывающим в части описания используемых подходов и методов и служит, прежде всего, для ознакомления с некоторыми важными проблемами изучения химического состава природных вод, закономерностями его изменения и формирования. Более глубокое освещение этих проблем можно найти в литературе, приведенной в конце пособия. В то же время следует отметить, что некоторые из них до сих пор недостаточно раскрыты.

Тем не менее, освоив данный курс, студент должен приобрести: 1) знания о структуре гидросферы Земли, химическом составе и качестве природных вод, факторах и процессах их формирования, в том числе формирования уровня содержания конкретных веществ, а также об основах математического моделирования гидрогеохимических процессов; 2) навыки классификации водных объектов, классификации вод по минерализации, химическому составу, величине рН, качеству (в соответствии с нормативными документами РФ), расчёта трансформации концентраций веществ в водных объектах; 3) знания о факторах формирования химического состава и качества поверхностных и подземных вод, методах нормирования сбросов загрязняющих веществ в водные объекты, методах очистки сточных вод, требованиях к функционированию поверхностных и подземных водозаборов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алекин О.А. Основы гидрохимии / О.А. Алекин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. – 444 с.
2. Алексеев В.А. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода. В 2 томах. Том 1. Система вода – порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / В.А. Алексеев, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцев и др. ; отв. ред. С.Л. Шварцев. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
3. Алексеевский Н.И. Гидрофизика / Н.И. Алексеевский. – Москва : Академия, 2006. – 176 с.
4. Алексеенко В.А. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых : учебник / В.А. Алексеенко. – Москва : Логос, 2005. – 354 с.
5. Боценок К.Л. О перспективах развития методов математического моделирования в исследованиях гидрохимических процессов / К.Л. Боценок, В.Л. Павелко // Гидрохимические материалы. – 1984. – Т. 92. – С. 46–52.
6. Бураков Д.А. Основы метеорологии, климатологии и гидрологии / Д.А. Бураков. – Красноярск : Изд-во КГАУ, 2011. – 279 с.
7. Веницианов Е.В. Физико-химические процессы в поверхностных водах / Е.В. Веницианов // Водные проблемы на рубеже веков : сб. статей под ред. М.Г. Хубларяна. – Москва : Наука, 1999. – С. 241–255.
8. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и её окружения / В.И. Вернадский. – Москва : АН СССР, 1965. – 328 с.
9. Винников С.Д. Гидрофизика : учебник / С.Д. Винников, Б.В. Проскуряков. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1988. – 248 с.
10. Виноградов Ю.Б. Расчёты стока. Перспективы развития методов нового поколения : Проблемы современной гидрологии / Ю.Б. Виноградов ; под ред. И.А. Шикломанова. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. – С. 184–195.
11. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование в гидрологии : учебное пособие / Ю.Б. Виноградов, Т.А. Виноградова. – Москва : Академия, 2010. – 304 с.
12. Водный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 03.06.2006 № 74-ФЗ. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_60683/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/)
13. Войткевич Г.В. Справочник по охране геологической среды. Том 1 / Г.В. Войткевич, И.В. Голиков-Заволженский, В.И. Коробкин и др. – Ростов-на-Дону : Феникс, 1996. – 448 с.

14. Войткевич Г.В. Краткий справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.Е. Мирошников, А.С. Поваренных, А.С. Прохоров. – Москва : Недра, 1977. – 184 с.
15. Воронов Ю.В. Водоотведение / Ю.В. Воронов, Е.В. Алексеев, В.П. Саломеев, Е.А. Пугачев. – Москва : ИНФРА-М, 2007. – 415 с.
16. ВСН 163-83. Ведомственные строительные нормы. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). – Москва : Госкомгидромет, 1985. – 142 с.
17. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / под ред. Т.В. Гусевой. – Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2007. – 192 с.
18. ГОСТ Р 59053-2020. Охрана окружающей среды. Охрана и рациональное использование вод. Термины и определения. – Москва : ФГУП «Стандартинформ», 2020. – 20 с.
19. ГОСТ Р 59054-2020. Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Классификация водных объектов. – Москва : ФГУП «Стандартинформ», 2020. – 24 с.
20. ГОСТ 17.1.2.04–77. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. – Москва : Госкомстандарт СССР, 1977. – 17 с.
21. ГОСТ 17.1.5.01–80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязнение. – Москва : Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.
22. ГОСТ 17.1.5.05–85. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. – Москва : ИПК «Издательство стандартов», 2000. – 11 с.
23. ГОСТ 17.2.4.05–83. Охрана природы. Атмосфера. Гравиметрический метод определения взвешенных частиц пыли. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 3 с.
24. ГОСТ 19179–73. Гидрология суши. Термины и определения. Дата введения 01.01.1975. Переиздание август 1988 г. – Москва : Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
25. ГОСТ 19185–73. Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения. – Москва : Изд-во стандартов, 1974. – 30 с.
26. ГОСТ 31862–2012. Вода питьевая. Отбор проб. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 10 с.
27. ГОСТ 24902–81. Вода хозяйственно-питьевого назначения. Общие требования к полевым методам анализа. – Москва : Изд-во стандартов, 2001. – 3 с.

28. ГОСТ 2761–84. Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора. – Москва : Стандартиформ, 2010. – 13 с.
29. ГОСТ 27065–86. Качество вод. Термины и определения. – Москва : ИПК «Издательство стандартов», 2001. – 18 с.
30. ГОСТ Р 51232–98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. – Москва : ФГУП «Стандартиформ», 2010. – 30 с.
31. ГОСТ 30813–2002. Вода и водоподготовка. Термины и определения. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 27 с.
32. ГОСТ Р ИСО 24512–2009. Деятельность, связанная с услугами питьевого водоснабжения и удаления сточных вод. Руководящие указания для менеджмента систем питьевого водоснабжения и оценки услуг питьевого водоснабжения. – Москва : Стандартиформ, 2011. – 69 с.
33. Грушевский М.С. О математическом моделировании процесса формирования речного стока / М.С. Грушевский // Вопросы математического моделирования гидрологических процессов : труды Государственного гидрологического института. Вып. 211. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1973. – С. 3–59.
34. Долгонос Б.М. Нелинейная стохастическая модель формирования ежедневных и среднемесячных расходов воды в речных бассейнах / Б.М. Долгонос, К.А. Корчагин // Водные ресурсы. – 2007. – Т. 34, № 6. – С. 662–672.
35. Дружинин Н.И. Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши / Н.И. Дружинин, А.И. Шишкин. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. – 390 с.
36. Дьяконов К.Н. Экологическое проектирование и экспертиза : учебник / К.Н. Дьяконов, А.В. Дончева. – Москва : Аспект Пресс, 2002. – 384 с.
37. Жук Д.М. Системы автоматизированного проектирования. В 9 книгах. Книга. 9. Иллюстрированный словарь / Д.М. Жук, П.К. Кузьмик, В.Б. Маничев и др. – Минск : Высшая школа, 1988. – 159 с.
38. Жуков А.И. Методы очистки производственных сточных вод / А.И. Жуков, И.Л. Монгайт, И.Д. Родзиллер. – Москва : Стройиздат, 1977. – 204 с.
39. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / Мингео СССР. – Москва : Недра, 1983. – 191 с.
40. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – Москва : Недра, 1965. – 227 с.

41. Караушев А.В. Речная гидравлика / А.В. Караушев. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. – 416 с.
42. Карпов И.К. Моделирование природного минералообразования на ЭВМ / И.К. Карпов, А.И. Киселев, Ф.А. Летников. – Москва : Недра, 1976. – 256 с.
43. Кирюхин В.А. Гидрогеохимия: учебник / В.А. Кирюхин, А.И. Коротков, С.Л. Шварцев. – Москва : Недра, 1993. – 384 с.
44. Крайнов С.Р. Анализ разрешающих возможностей прогнозных моделей изменений химического состава подземных вод, их оптимальное геохимическое содержание / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко // Геохимия. – 2000. – № 7. – С. 691–703.
45. Крайнов С.Р. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец. – Москва : Наука, 2004. – 677 с.
46. Крайнов С.Р. Методы гидрогеохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии / С.Р. Крайнов, Ю.В. Шваров, Д.В. Гричук и др. – Москва : Недра, 1988. – 254 с.
47. Кривошеин Д.А. Инженерная защита поверхностных вод от промышленных стоков / Д.А. Кривошеин, П.П. Кукин, В.Л. Лапин и др. – Москва : Высшая школа, 2003. – 344 с.
48. Кузеванов К.И. Математическое моделирование процессов в компонентах природы : учебное пособие / К.И. Кузеванов, О.Г. Савичев, М.В. Решетько. – Томск : Изд-во ТПУ, 2012. – 144 с.
49. Кузнецова А.И. Определение микроэлементов в природных средах. Аналитические исследования и проблемы (на примере Байкальского региона). Аналитический обзор / А.И. Кузнецова, Л.Л. Петров, В.А. Ветров и др. – Новосибирск : СО РАН ; ГПНТБ, 1994. – 84 с.
50. Кутепов А.М. Химическая гидродинамика : справочное пособие / А.М. Кутепов, А.Д. Полянин, З.Д. Запрянов и др. – Москва : Бюро Квантум, 1996. – 336 с.
51. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – Москва : Мир, 1982. – 520 с.
52. Мазаев В.Т. Руководство по гигиене питьевой воды и питьевого водоснабжения / В.Т. Мазаев, А.П. Ильиницкий, Т.Г. Шлепнина. – Москва : ООО «Медицинское информационное агентство», 2008. – 320 с.
53. Математический энциклопедический словарь / под ред. Ю.В. Прохорова, С.И. Адяна, Н.С. Бахвалова и др. – Москва : БЭС, 1995. – 847 с.

54. Мелиорация и водное хозяйство. В 5 томах. Том 5. Водное хозяйство / под ред. И.И. Бородавченко. – Москва : Агропромиздат, 1988. – 400 с.
55. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей. Утв. Приказом МПР России от 17.12.2007 г. № 333. Зарегистр. в Минюст РФ от 21.02.2008 г. № 11198. – Москва : МПР России, 2008. – 35 с.
56. Методика расчета водохозяйственного баланса водных объектов. Утв. Приказом МПР России от 30.11.2007 г. № 317. – Москва : МПР России, 2007. – 41 с.
57. Методика расчета водохозяйственных балансов водных объектов. Утв. Приказом МПР РФ от 30.11.2007 г. № 314. Зарегистр. в Минюсте РФ 29.12.2007 г. № 10861. – Москва : МПР России, 2008. – 135 с.
58. Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод / под ред. А.В. Караушева. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. – 175 с.
59. Методические рекомендации по гидрогеохимическим работам масштабов 1:1 000 000 и 1: 200 000, проводимым при многоцелевом геохимическом картировании / Б.А. Колотов, С.Г. Мелькановицкая, Д.Е. Кулагин и др. – Москва : ИМГРЭ, 2001. – 94 с.
60. Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты. Утв. Приказом МПР России от 12.12.2007 г. № 328. Зарегистр. в Минюст РФ от 23.01.2008 г. № 10974. – Москва : МПР России, 2008. – 34 с.
61. Михайлов В.Н. Гидрология / В.Н. Михайлов, А.Д. Добровольский, С.А. Добролюбов. – Москва : Высшая школа, 2005. – 463 с.
62. Найдёнов В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши / В.И. Найдёнов. – Москва : Наука, 2004. – 318 с.
63. Недоливко Н.М. Геохимия : учебное пособие / Н.М. Недоливко. – Томск : Изд-во ТПУ, 2005. – 102 с.
64. О недрах [Электронный ресурс] : федеральный закон от 03.03.1995 № 27-ФЗ. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/9003403>
65. Об охране окружающей среды [Электронный ресурс]: федеральный закон № 7-ФЗ. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/)
66. Основы научных исследований : учебник / под ред. В.И. Крутова и В.В. Попова. – Москва : Высшая школа, 1989. – 345 с.
67. Перельман А.И. Геохимия ландшафта : учебное пособие / А.И. Перельман. – Москва : Высшая школа, 1975. – 336 с.



68. Пособие к СНиП 2.05.03–84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91). – Москва : ГУПиКС, 1992. – 374 с.
69. Проектирование сооружений для забора поверхностных вод. Справочное пособие к СНиП 2.04.02–84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения». ВНИИ ВОДГЕО. – Москва : Стройиздат, 1990. – 223 с.
70. Раткович Д.Я. Актуальные проблемы водообеспечения / Д.Я. Раткович. – Москва : Наука, 2003. – 352 с.
71. РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Ввод в действие 03.04.2017. – Ростов-на-Дону : Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2016. – 104 с.
72. Р 52.24.353-2012. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. Ввод в действие с 02.04.2012. – Ростов-на-Дону : Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2012. – 39 с.
73. РД 52.24.509-2015. Внутренний контроль качества гидрохимической информации. Ввод в действие с 15.02.2016. – Ростов-на-Дону : Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2015. – 81 с.
74. РД 52.24.609-2013. Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях водных объектов. Ввод в действие с 02.09.2013. – Ростов-на-Дону : Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2013. – 43 с.
75. РД 52.24.622-2019. Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод. Ввод в действие с 01.11.2019. – Ростов-на-Дону : Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2019. – 98 с.
76. РД 52.24.643–2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ввод в действие с 01.01.2004. – Москва : Росгидромет, 2002. – 34 с.
77. Резников А.А. Методы анализа природных вод / А.А. Резников, Е.П. Муликовская, И.Ю. Соколов. – Ленинград : Госгеотехиздат, 1963. – 404 с.
78. Реймерс Н.Ф. Природопользование : словарь-справочник / Н.Ф. Реймерс. – Москва : Мысль, 1990. – 639 с.
79. Рекомендации по гидрогеологическим расчётам для определения границ 2 и 3 поясов зон санитарной охраны подземных источников

- хозяйственно-питьевого водоснабжения. – Москва : ВНИИ «ВОД-ГЕО», 1983. – 84 с.
80. Рождественский А.В. Статистические методы в гидрологии / А.В. Рождественский, А.И. Чеботарёв. – Ленинград : Гидрометеопиздат, 1974. – 424 с.
  81. Руководство по разработке раздела «Охрана окружающей природной среды» в проектах карьеров обводненных месторождений песчано-гравийных материалов. – Москва : Минтранс РФ, 1996. – 125 с.
  82. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области / О.Г. Савичев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2010. – 248 с.
  83. Савичев О.Г. Гидрология, метеорология и климатология: гидрологические расчёты : учебное пособие / О.Г. Савичев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. – 224 с.
  84. Савичев О.Г. Метод оценки допустимых антропогенных изменений химического состава поверхностных вод / О.Г. Савичев // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 4. – С. 51–55.
  85. Савичев О.Г. Оценка влияния сбросов сточных вод на минерализацию и общее содержание органических веществ в водах Томи / О.Г. Савичев // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 1. – С. 44–47.
  86. Савичев О.Г. Проблемы нормирования сбросов загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты / О.Г. Савичев // Вода: химия и экология. – 2010. – № 9. – С. 35–39.
  87. Савичев О.Г. Теоретические основы охраны окружающей среды: учебное пособие / О.Г. Савичев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2012. – 126 с.
  88. Савичев О.Г. Фоновые концентрации веществ в речных водах таежной зоны Западной Сибири / О.Г. Савичев // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 334. – С. 169–175.
  89. Савичев О.Г. Методика эколого-геохимических исследований : учебное пособие / О.Г. Савичев, Ю.Г. Копылова, Р.Ф. Зарубина и др. – Томск : Изд-во ТПУ, 2012. – 170 с.
  90. Савичев О.Г. Экологическое нормирование: Методы расчета допустимых сбросов загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты суши. : учебное пособие. Часть 1 / О.Г. Савичев, К.И. Кузеванов, А.А. Хвощевская, В.В. Янковский. – 2-е изд. – Томск : Изд-во ТПУ, 2009. – 106 с.
  91. Савичев О.Г. О методике определения фоновых и аномальных значений гидрогеохимических показателей / О.Г. Савичев, В.Л. Нгуен //

- Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 9. – С. 133–142.
92. Савичев О.Г. Эксплуатация и мониторинг систем и сооружений природообустройства и водопользования / О.Г. Савичев, В.К. Попов, К.И. Кузеванов. – Томск : Изд-во ТПУ, 2014. – 216 с.
  93. СанПиН 2.1.4.1074–01. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. – Москва : Минздрав РФ, 2001. – 16 с.
  94. СанПиН 2.1.4.1110-02. Санитарные правила и нормы. Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения. Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Дата введения 01.06.2002 г. – Москва : Роспотребнадзор, 2002. – 12 с.
  95. СанПиН 2.1.5.980-00. Санитарные правила и нормы. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. – Москва : Минздрав РФ, 2000. – 23 с.
  96. СанПиН 2.1.7.573-96. Почва. Очистка населенных мест. Бытовые и промышленные отходы. Санитарная охрана почвы. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения. Санитарные правила и нормы. – Москва : Росстрой, 1996. – 25 с.
  97. Сафронова К.И. Структура и информационное обеспечение системы контроля качества поверхностных вод / К.И. Сафронова, Е.В. Веницианов, А.Г. Кочарян и др. // Водные ресурсы. – 1997. – № 6. – С. 711–717.
  98. Синянский И.А. Проектно-сметное дело / И.А. Синянский, Н.И. Манешина. – Москва : Изд. центр «Академия», 2007. – 448 с.
  99. Системный анализ и принятие решений : словарь-справочник / под общей ред. В.Н. Волковой и В.Н. Козлова. – Москва : Высшая школа, 2004. – 616 с.
  100. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Ввод в действие с 01.01.2013. – Москва : Минстрой России, 2015. – 126 с.
  101. СП 30.13330.2016. Свод правил. Внутренний водопровод и канализация зданий. Актуализированная редакция СНиП 2.04.01–85\*. Ввод. в действие с 17.06.2017. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 93 с.
  102. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. Ввод. в действие с 26.06.2019. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 71 с.

103. СП 33-101–2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – Москва : Госстрой России, 2004. – 72 с.
104. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. – Москва : Минрегион России, 2012. – 40 с.
105. СП 11-102-97. Свод правил по инженерным изысканиям для строительства. Инженерно-экологические изыскания для строительства. – Москва : ПНИИИС Госстроя России, 1997. – 41 с.
106. СП 11-103-97. Свод правил по инженерным изысканиям для строительства. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. – Москва : ПНИИИС Госстроя России, 1997. – 32 с.
107. СП 11-105-97. Свод правил по инженерным изысканиям для строительства. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 1. Общие правила производства работ. – Москва : ПНИИИС Госстроя России, 1998. – 50 с.
108. Справочник по гидрохимии / под ред. А.В. Никанорова. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. – 391 с.
109. Справочник по современным технологиям очистки природных и сточных вод и оборудованию / Kruger International Consult A/S, Denmark, V.F. Karpuhin. – Copenhagen : Ministry of Environment and Energy, Danish Environment Protection Agency, Printed by Schultz Grafisk, 2001. – 253 p.
110. Справочник по водоснабжению и канализации / под ред. д-ра техн. наук проф. Н.Ф. Федорова ; Гос. проектный ин-т «Водоканалпроект». Ленингр. отд-ние. – Ленинград ; Москва : Госстройиздат. [Ленингр. отд-ние], 1959. – 411 с.
111. СТО ГУ ГГИ 08.29-2009. Учет руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки. – Москва : Нестор-История, 2009. – 175 с.
112. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200000 / А.А. Головин, Н.Н. Москаленко, А.И. Ачкасов, К.Л. Волочкович и др. – Москва : ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
113. Трофимов В.В. Имитационная модель, описывающая миграцию химических веществ в системе «вода – донные отложения» и пути ее численной реализации / В.В. Трофимов, В.И. Манихин // Гидрохимические материалы. – Том ХСII. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. – С. 65–72.
114. Трудоношин В.А. Системы автоматизированного проектирования. В 9 книгах. Книга 4. Математические модели технических объектов /

- В.А. Трудоношин, Н.В. Пивоварова. – Минск : Вышэйшая школа, 1988. – 159 с.
115. Учет и оценка природных ресурсов и экологического состояния территорий различного функционального использования / под ред. Э.К. Буренкова и Е.И. Филатова. – Москва : ИМГРЭ, 1996. – 88 с.
  116. Философский словарь / под ред. И.Т. Фролова. – Москва : Изд-во политической литературы, 1981. – 445 с.
  117. Харин Ю.С. Основы имитационного и статистического моделирования / Ю.С. Харин, В.И. Малюгин, В.П. Кирлица и др. – Минск : Изд-во «Дизайн ПРО», 1997. – 288 с.
  118. Хаустов А.П. Устойчивость подземной гидросферы и основы экологического нормирования / А.П. Хаустов. – Москва : ГЕОС, 2007. – 175 с.
  119. Христофоров А.В. Стохастическая модель колебаний речного стока в паводочный период / А.В. Христофоров, Г.В. Круглова, Т.В. Самборский. – Москва : МГУ, 1998. – 146 с.
  120. Цхай А.А. Математическое моделирование процессов трансформации соединений азота и фосфора и изменчивости кислородного режима в водохранилище / А.А. Цхай, В.Ю. Агейков // Водные ресурсы. – 1997. – № 6. – С. 718–728.
  121. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология : учебник / С.Л. Шварцев. – Москва : Недра, 1996. – 423 с.
  122. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев. – 2-е изд. – Москва : Недра, 1998. – 366 с.
  123. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения : справочник. – Ленинград : Стройиздат, 1988. – 383 с.
  124. Яковлев С.В. Комплексное использование водных ресурсов : учебное пособие / С.В. Яковлев и др. – Москва : Высшая школа, 2005. – 384 с.
  125. Lerman A. Geochemical Processes Water and Sediment Environments / A. Lerman. – New York : Wiley – Interscience Public, 1979. – 481 p.
  126. Livingstone D.A. Chemical composition of rivers and lakes / D.A. Livingstone // Geol. Surv. Prof. Papers. – 1963. – № 440-G. – P. 64.
  127. Loucks D.P. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications / D.P. Loucks, E. Van Beek. – Turin : Unesco Publishing, 2005. – 680 p.
  128. Martin J.M. Elemental mass-balance of material carried by world rivers / J.M. Martin, M. Meybeck // Mar. Chem. – 1979. – Vol. 7, № 2. – P. 173–206.

129. Meybeck M. Concentrations des eaux fluviales en elements majeurs et apportes en solution aux oceans / M. Meybeck // *Rev. Geolog. Dynam. Et Geograp. Phys.* – 1979. – Vol. 21. – P. 215–246.
130. Meybeck M. Carbon, nitrogen and phosphorus transported by world rivers / M. Meybeck // *Am. J. sci.* – 1982. – Vol. 282. – P. 401–405.
131. Modelling in Aquatic Chemistry / editors I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris (France) : OECD, 1997. – 724 p.
132. Turekian K.K. The oceans, streems and atmosphere / K.K. Turekian // *Handb. Geochim.* – Berlin, N.Y, 1969. – P. 297–323.
133. Vuksanovic V. Transport of polychlorinated biphenyls (PCB) in the Scheldt Estuary simulated with the water quality model WASP / V. Vuksanovic, F. De Smedt, S. Van Meerbeeck // *Journal of Hydrology.* – 1996. – Vol. 174. – P. 1–18.
134. White Ar.F. Chemical weathering rates of silicate minerals in soils / Ar. F. White // *Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals*; Mineralogical Society of America. – 1995. – Vol. 31. – P. 405–462.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>1. ВОДА, ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ, ГИДРОСФЕРА .....</b>	<b>5</b>
1.1. Общие сведения о воде.....	5
1.2. Гидросфера и составляющие её водные объекты.....	7
Контрольные вопросы и задания.....	14
<b>2. СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД.....</b>	<b>15</b>
2.1. Химический состав вод, физико-химические и гидрохимические показатели .....	15
2.2. Способы выражения концентраций .....	28
2.3. Краткая характеристика химического состава природных вод ....	31
2.4. Классификации вод по гидрохимическим и физико-химическим показателям .....	34
2.5. Качество природных вод.....	39
Контрольные вопросы и задания.....	43
<b>3. ФАКТОРЫ И ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ     ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД .....</b>	<b>44</b>
3.1. Факторы формирования химического состава природных вод ...	44
3.1.1. Породы .....	44
3.1.2. Почвы .....	48
3.1.3. Живые организмы .....	52
3.1.4. Деятельность человека .....	53
3.1.5. Климат .....	54
3.1.6. Рельеф.....	55
3.1.7. Водный режим.....	56
3.1.8. Взвешенные вещества .....	59
3.1.9. Донные отложения.....	60
3.2. Процессы формирования химического состава природных вод ..	62
3.2.1. Молекулярная диффузия .....	62
3.2.2. Турбулентная диффузия.....	63
3.2.3. Диффузионно-конвективный массоперенос .....	64
3.2.4. Процессы, переводящие вещество в раствор .....	64
3.2.5. Процессы, выводящие вещество из раствора .....	65
3.2.6. Обменные процессы вещества.....	67
Контрольные вопросы и задания.....	69

<b>4. ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД.....</b>	<b>71</b>
4.1. Формирование ионного состава .....	71
4.1.1. Атмосферные осадки .....	73
4.1.2. Речные воды.....	74
4.1.3. Озёрные воды .....	76
4.1.4. Подземные воды.....	76
4.2. Формирование биогенных веществ .....	84
4.2.1. Соединения азота .....	84
4.2.2. Соединения фосфора .....	86
4.2.3. Кремний .....	87
4.3. Формирование органических веществ.....	89
4.4. Формирование микроэлементного состава .....	91
4.5. Формирование газового состава.....	94
4.5.1. Кислород .....	96
4.5.2. Диоксид углерода.....	97
4.5.3. Прочие газы .....	98
Контрольные вопросы и задания.....	99
<b>5. МЕТОДИКА ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>100</b>
5.1. Проектирование и подготовительные работы .....	100
5.1.1. Общая структура подготовительного этапа .....	100
5.1.2. Общая структура проекта гидрохимических исследований ..	102
5.2. Полевые работы .....	103
5.2.1. Опробование вод поверхностных и подземных водных объектов.....	104
5.2.2. Опробование атмосферных осадков .....	114
5.2.3. Опробование морского и ледникового льда, льда водоемов и водотоков .....	115
5.2.4. Контроль качества первичной информации.....	117
5.2.5. Полевые камеральные работы .....	118
5.2.6. Контроль качества пробоотбора.....	118
5.3. Аналитические работы .....	119
5.4. Камеральные работы .....	122
Контрольные вопросы и задания.....	125
<b>6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД.....</b>	<b>126</b>
6.1. Общие подходы к математическому моделированию .....	126
6.2. Детерминированные модели формирования водного стока .....	130



6.3. Пример детерминированной модели формирования минерализации речных вод под влиянием выпусков сточных вод.....	138
6.4. Стохастические модели формирования химического состава вод .....	139
Контрольные вопросы и задания.....	141
<b>7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДОПОДГОТОВКИ И ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД .....</b>	<b>142</b>
7.1. Водозаборы .....	143
7.1.1. Водозаборы из поверхностных источников.....	148
7.1.1.1. Общие требования.....	148
7.1.1.2. Условия забора воды из водотоков .....	150
7.1.1.3. Условия забора воды из водоёмов.....	153
7.1.1.4. Классификация, категории и требования к водозаборным сооружениям из поверхностных источников .....	156
7.1.2. Водозаборы из подземных источников .....	161
7.1.2.1. Водозаборные скважины .....	161
7.1.2.2. Шахтные колодцы.....	164
7.1.2.3. Горизонтальные водозаборы.....	165
7.1.2.4. Лучевые водозаборы .....	166
7.1.2.5. Каптаж родников.....	167
7.1.2.6. Искусственное пополнение запасов подземных вод.....	168
7.2. Очистные сооружения и поля орошения.....	169
7.2.1. Общая характеристика методов очистки сточных вод .....	169
7.2.2. Системы канализации.....	174
Контрольные вопросы и задания.....	177
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>179</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>180</b>

Учебное издание

# ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Учебно-методическое пособие

*Составители*

ПАСЕЧНИК Елена Юрьевна  
САВИЧЕВ Олег Геннадьевич  
КУЗЕВАНОВ Константин Иванович

Корректурa *Д.В. Заремба*  
Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*  
Дизайн обложки *А.И. Сидоренко*

Подписано к печати 18.01.2021. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать CANON. Усл. печ. л. 11,28. Уч.-изд. л. 10,20.  
Заказ 05-21. Тираж 100 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ