

Современные проблемы биосферы



К.Е. Питьева

**Гидрогеохимические
аспекты охраны
геологической
среды**

Издательство «Наука»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ БИОСФЕРЫ



Современные проблемы биосферы



Редколлегия серии "Современные проблемы биосферы"

Председатель – академик А.Л. ЯНШИН

Члены редколлегии:

- доктор географических наук С.Л. ВЕНДРОВ,
доктор геолого-минералогических наук Э.М. ГАЛИМОВ,
академик И.П. ГЕРАСИМОВ (зам. председателя),
доктор географических наук М.Г. ГРОСВАЛЬД,
доктор экономических наук А.А. ГУСЕВ,
доктор географических наук С.А. ЕВТЕЕВ (зам. председателя),
Т.Н. КАСТРЕЛЬ (отв. секретарь),
доктор юридических наук О.С. КОЛБАСОВ,
академик Б.Н. ЛАСКОРИН,
доктор физико-математических наук А.М. МОЛЧАНОВ,
академик АН ТССР Н.Т. НЕЧАЕВА,
доктор географических наук В.С. ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ,
академик В.Е. СОКОЛОВ (зам. председателя),
доктор геолого-минералогических наук В.Т. ТРОФИМОВ,
кандидат химических наук Л.М. ФИЛИППОВА,
академик А.В. ФОКИН,
член-корреспондент АН СССР И.Т. ФРОЛОВ,
кандидат исторических наук Г.С. ХОЗИН,
доктор философских наук О.Н. ЯНИЦКИЙ

Современные проблемы биосферы



К.Е.Питьева

Гидрогеохимические
аспекты охраны
геологической
среды

Ответственный редактор
доктор геолого-минералогических наук
Н.В. РОГОВСКАЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"
МОСКВА 1984



4232

П и т ь е в а К.Е. Гидрогеохимические аспекты охраны геологической среды. М.: Наука, 1984.

В монографии рассматриваются вопросы формирования химического состава подземных вод в антропогенных условиях и влияния гидрогеохимических процессов на геологическую среду. Отражены гидрогеохимические аспекты охраны подземных вод от загрязнения, изменения их качества при эксплуатации для водоснабжения, утилизации промышленных отходов путем подземного захоронения и в инженерно-геологических целях. Рассматриваются принципы гидрогеохимического картирования и районирования в техногенных условиях, теоретические основы прогноза изменения геологической среды и ее рационального использования, методика обнаружения зон потенциального ухудшения качества подземных вод и др.

Табл. 36. Ил. 43. Библиогр.: с. 214—218 (130 назв.).

Рецензенты:

А.В. Щербаков, А.И. Прякин

Введение

Основной целью гидрогеохимических исследований по проблеме охраны геологической среды является изучение особенностей формирования и преобразования химического состава подземных вод в антропогенных условиях, а также изучение влияния физико-химических процессов и явлений на окружающую среду.

В.И. Вернадский в своих фундаментальных трудах отмечал, что человек в пределах ноосферы — нового геологического явления планеты Земля — является крупной геологической силой, способной перестраивать и преобразовывать природу.

В этих условиях особенно остро стоит вопрос о разумной увязке взаимоположенных направлений деятельности человека — полезной и вызывающей неблагоприятные изменения геологической среды.

“Охрану” геологической среды человеком следует рассматривать как активное мероприятие, которое не ограничивается пассивной деятельностью человека по сохранению геологических объектов и явлений в неизменном состоянии, а способствует рациональному развитию промышленности и сельского хозяйства. При этом человек, активно вмешиваясь в геологическую среду, разумно преобразует ее в направлениях, при которых не теряются ее жизненно полезные природные аспекты.

Впервые понятие об охране подземных вод от антропогенного влияния было сформулировано Европейской хозяйственной комиссией совместно с Всемирной организацией здоровья (WHO) в 1956 г.: “Под охраной качества воды понимаются все мероприятия научного, технического, организационного и административного плана, цель которых — охрана поверхностных и подземных вод от загрязнения и уничтожения”.

В настоящее время Генеральной ассамблеей ООН период 1981–1990 гг. провозглашен “международным десятилетием обеспечения питьевой водой и улучшения санитарных условий”.

Научной основой рационального использования земных богатств человеком является идеология познания, согласно которой вся человеческая практика в различных областях науки, в том числе в области гидрогеохимии, должна определять связь исследуемых объектов с нуждами человека.

Вопросами охраны природной среды в целом в настоящее время занимаются самые разнообразные отрасли науки; большое место этим вопросам отводится и в геологических науках. Эти науки наряду с другими, изучающими изменения природных объектов под влиянием антропогенного воздействия, объединяются в “науку о среде — созологию”. Создание новой науки диктуется острой необходимостью, и она развивается быстрыми темпами. В ее ведении находятся элементы самой разнообразной деятельности человека (технической, государственной, в области природы и т.д.), приводящей к изменению различных объектов и среды обитания человека. Большое внимание созологией отводится методологии изучения изменений природных объектов под влиянием деятельности человека. Созология на основе исследования и установления закономерностей изменения природных объектов человеком разрабатывает и предлагает методику управления деятельностью человека, при которой последняя оказывается наиболее приемлемой и полезной.

Среди различных видов геологических исследований, направленных на охрану среды, гидрогеохимические исследования занимают особое место, так как призваны решать важную самостоятельную проблему изменения качества подземных вод под влиянием антропогенных факторов, а также изменений, происходящих в геологических объектах под влиянием подземных вод.

Гидрогеохимические исследования охраны геологической среды являются составной частью гидрогеохимии — раздела гидрогеологии, изучающего химический состав подземных вод, пути его формирования, особенности распространения, области практического применения и преобразования под влиянием деятельности человека.

В предлагаемой монографии гидрогеохимические аспекты охраны геологической среды рассматриваются преимущественно с геолого-гидрогеологических позиций, что обуславливается необходимостью разработки натуральных моделей для прогнозной количественной оценки охранных мероприятий.

Для решения гидрогеохимических задач охраны геологической среды используются эмпирические и теоретические методы познания; широко применяются региональные геолого-гидрогеологические и гидродинамические построения, экспериментальные исследования и прогнозная оценка изменений среды, т.е. используется комплексный подход, отвечающий требованиям научной методологии познания. Главным требованием научной методологии познания является целостность исследования предметов и явлений. Все построения основываются на положениях общей гидрогеохимии и генетической гидрогеохимии, представляющей собой теоретические основы формирования химического состава подземных вод в естественных и измененных условиях.

Под естественным состоянием подземных вод и геологической среды в целом понимается состояние, которое в случае исследования влияния на нее антропогенных факторов следует рассматривать только с современных позиций. Такой подход оправдывается тем, что вмешательство человека в естественную геологическую среду до самого последнего времени было незначительным и лишь вторая половина XIX в. ознаменовалась интенсивным развитием хозяйственно-мелиоративных работ, горных разработок, гидротехнических и гидрогеологических работ в связи с водоснабжением и пр., что определило значительные изменения в геологической среде.

Подземную воду с точки зрения геологии следует рассматривать как сложную природную систему подземной гидросферы, характеризующуюся единством и взаимообусловленностью химических и динамических свойств, определяемых геохимическими и структурными особенностями самой системы и особенностями вмещающей (породы) и окружающей (атмосфера, биосфера и др.) сред. Это определение подземной воды является обоснованием теоретической и методической направленности гидрогеохимических исследований любой из геологических проблем, в том числе проблемы охраны геологической среды.

К основным видам хозяйственной деятельности человека, способствующим изменению качества подземных вод, относятся промышленное производство, сельскохозяйственные работы, разного рода строительства, сопровождающиеся иногда их загрязнением; использование подземных вод как полезного ископаемого, нередко вызывающее нарушение естественных гидродинамических условий, способствующих смещению вод различного состава и формированию качественно новых подземных вод; эксплуатация подземных вод, способствующая формированию новых окислительно-восстановительных и прочих обстановок.

В схематизированном виде гидрогеохимические исследования в области охраны геологической среды составляют следующие основные категории исследований: 1) в связи с охраной подземных вод от загрязнения; 2) в связи с утилизацией промстоков путем их подземного захоронения; 3) исследования изменения качества подземных вод при эксплуатации для водоснабжения; 4) в инженерно-геологических целях.

Гидрогеохимические аспекты охраны подземных вод от загрязнения выделяются в самостоятельную категорию вследствие их исключительной важности.

Расширение видов промышленных предприятий и увеличение объемов работ предприятий существующих отраслей промышленности создают в последние десятилетия серьезную угрозу ухудшения качества подземных вод вследствие их загрязнения. Многие поверхностные водотоки и водоемы, взаимодействующие с подземными водами, к настоящему времени содержат те или иные количества посторонних, иногда вредных для живой природы веществ. Опубликованы материалы, свидетельствующие о незначительных масштабах загрязнения гидросферы, несмотря на принятие серьезных мер по очистке сточных вод промышленных предприятий. В некоторых районах земного шара вследствие загрязнения уже сейчас ощущается недостаток воды хорошего качества.

Главными вопросами изучения гидрогеохимического состояния геологической среды в связи с подземным захоронением промстоков являются изменение проницаемости пород-коллекторов под физико-химическим воздействием промстоков, миграция промстоков.

Изменение качества подземных вод при их усиленной эксплуатации во многих случаях делает эти воды непригодными для водоснабжения, что снижает их эксплуатационные запасы. Вследствие этого проблема прогноза рационального подхода к использованию подземных вод является одной из наиболее важных и гидрогеохимическая сторона прогноза занимает в ней не последнее место.

Гидрогеохимические исследования в инженерно-геологических целях — это изучение формирования специфических гидрогеохимических условий (жесткости и агрессивности), отрицательно проявляющихся на инженерно-геологической деятельности человека; исследование изменения инженерно-геологических свойств пород под влиянием физико-химических процессов; изучение изменения качества подземных вод под влиянием строительства и разработки полезных ископаемых и др.

При решении проблемы гидрогеохимических исследований в связи с охраной геологической среды одно из центральных мест занимают вопросы миграции.

В гидрогеохимии под миграцией понимается любое перемещение компонентов в подземной воде и в системах, образуемых подземными водами с породами и другими средами, протекающее под влиянием свойств элементов и свойств сред и приводящее к качественно-количественному перераспределению компонентов в водах и других средах. Самая обширная миграционная система: "подземная вода — поверхностная вода — порода — газ — органическое вещество (твердое, нефть, микроорганизмы) — загрязняющие компоненты". При гидрогеохимических исследованиях в целях охраны геологической среды, как правило, эта система сразу полностью не действует. Она распадается на несколько более мелких миграционных систем. В случае исследования изменения качества подземных вод в условиях нарушенного режима наиболее общая миграционная система — это "подземная вода — порода — газ", в случае загрязнения — "подземная вода — порода — газ — загрязняющие компоненты" и т.д.

Методологические основы гидрогеохимических исследований в целях охраны геологической среды

1.1. Классификационные приемы обработки гидрогеохимических материалов

1.1.1. Классифицирование подземных вод по химическому составу

Классифицированием подземных вод по химическому составу при гидрогеохимических исследованиях в целях охраны геологической среды предусматривается деление подземных вод по совокупности гидрогеохимических параметров на виды и разновидности.

Классификации, используемые при классифицировании, должны содержать классификационные единицы с граничными условиями, соответствующими водам хорошего качества, что позволяет выделить на их фоне подземные воды, на качество которых оказали отрицательное влияние антропогенные факторы. Применяются классификации двух типов: 1) по степени минерализации, 2) по ионному составу.

При различных аспектах исследований в целях охраны геологической среды классификации по степени минерализации каждый раз должны учитывать специфику решаемых задач.

Так, в обычных условиях граничная суммарная минерализация подземных вод, используемых для водоснабжения, равна 1 г/л, в областях с недостатком пресных вод — 1,5 и 3 г/л.

При более детальных исследованиях в целях водоснабжения пресные подземные воды классифицируются на воды со степенью минерализации менее 0,1 г/л — неблагоприятные, от 0,1 до 0,3 — относительно благоприятные, от 0,3 до 1 — благоприятные.

При гидрогеохимических исследованиях в инженерно-геологических целях важно выделить суммарную минерализацию, выше которой из подземных вод возможно выпадение сульфата кальция (около 2 г/л), карбоната кальция и магния (около 0,5—0,6 г/л) и т.д.

Для классифицирования подземных вод по ионному составу при гидрогеохимических исследованиях в целях охраны геологической среды можно использовать существующие классификации, в том числе так называемые общие классификации. Региональные классификации [Брусилковский, 1966; и др.] предназначены для работы с подземными водами только конкретных районов, и использовать их не представляется возможным. В то же время разработка в каждом отдельном случае региональной классификации очень трудоемка и во многих случаях нерациональна.

В основу построения общих классификаций заложено различное комбинирование ионов.

В одних случаях комбинирование ионов основано на коэффициентах без учета количественных критериев. Коэффициенты выбираются и предлагаются таким образом, что в наименование воды по химическому составу входят специфические, содержащиеся часто в воде в незначительных концентрациях компоненты. Это классификации О.А. Алекина [1946], В.А. Сулина [1948] и др.

Выбор коэффициентов для комбинирования ионов разными исследовате-

лями осуществляется неодинаково. Некоторыми исследователями (В.А. Сулиным и др.) выбор коэффициентов обосновывается особенностями распространения в различных геологических обстановках земной коры подземных вод определенного химического состава, другими исследователями (М.Г. Валяшко и др.) — закономерными изменениями в составе вод в соответствии с растворимостями соединений и т.д.

Использование общих классификаций, основанных на комбинировании компонентов с помощью коэффициентов, нежелательно вследствие слабого соответствия номенклатурного (в соответствии с классификациями) положения воды ее реальному составу. Например, при отнесении воды на основании коэффициента $r \text{Cl}^- - r \text{Na}^+ > 1$ (классификация В.А. Сулина) к хлоркальциевому типу не означает, что кальций в этой воде среди катионов является преобладающим; его концентрации могут составлять доли единиц или процентов.

В других случаях ионы комбинируются без учета количественных критериев на основании установления преобладания одних над другими путем относительного сочетания ионов. В самом простом варианте при этом выделяются преобладающие анионы и катионы и вода получает соответствующее им наименование. В более сложных вариантах выделяются еще и вторые по порядку преобладания анионы и катионы и наименование воды составляется из большего числа ионов. Сочетаний может быть множество.

В третьем случае для классифицирования вод по химическому составу комбинирование ионов проводится с учетом количественных критериев. Они служат основанием для включения ионов в формулу химического состава. Вода именуется в соответствии с теми ионами, содержание которых в воде в конкретном случае превышает условную величину. В классификациях различных исследователей эти величины неодинаковы (у С.А. Щукарева — 25 экв %, у О.Я. Бозояна — 20, у В.А. Приклонского — 75, 50 и 25 экв % и т.д.).

Разнообразие количественных критериев определения химического состава подземных вод является результатом их слабой обоснованности. В классификации К.Е. Питьевой [1978] количественные критерии установлены статистическим путем на большом фактическом материале, представленном водами различных регионов и разнообразных гидрогеологических структур. Поэтому пользование данной классификацией позволяет получить реальное представление о преобладающих и второстепенных ионах в химическом составе подземной воды.

Классификация К.Е. Питьевой отличается от других классификаций конкретизацией соотношения между суммарной минерализацией подземных вод и анионно-катионным их составом, схематизированным в гидрогеохимические типы и классы (рис. 1.).

Подземная вода, исходя из классификации К.Е. Питьевой, получает комплексное анионно-катионное наименование. В него входят ионы, содержание которых равно или превышает 10 экв % (при сумме анионов и катионов по 50 экв %). Ион, которого больше, записывается на первое место. Наименование по анионам дается впереди наименования по катионам. При содержании иона в количестве от 5 до 10 экв % он включается в наименование подземной воды с ограничением "повышенное содержание" (сокращенно "п"). Состав воды записывается в виде формулы с помощью химических индексов. Принадлежность подземной воды к гидрогеохимическим типам и классам логически вытекает из характеристики гидрогеохимической группы. Так, вода состава хлоридного с повышенным гидрокарбонат-ионом натриевого с повышенным кальцием ($\text{Cl п. HCO}_3 \text{ Na п. Ca}$) относится к хлоридному и натриевому типам, к классам $\text{Cl} > \text{HCO}_3 > \text{SO}_4$

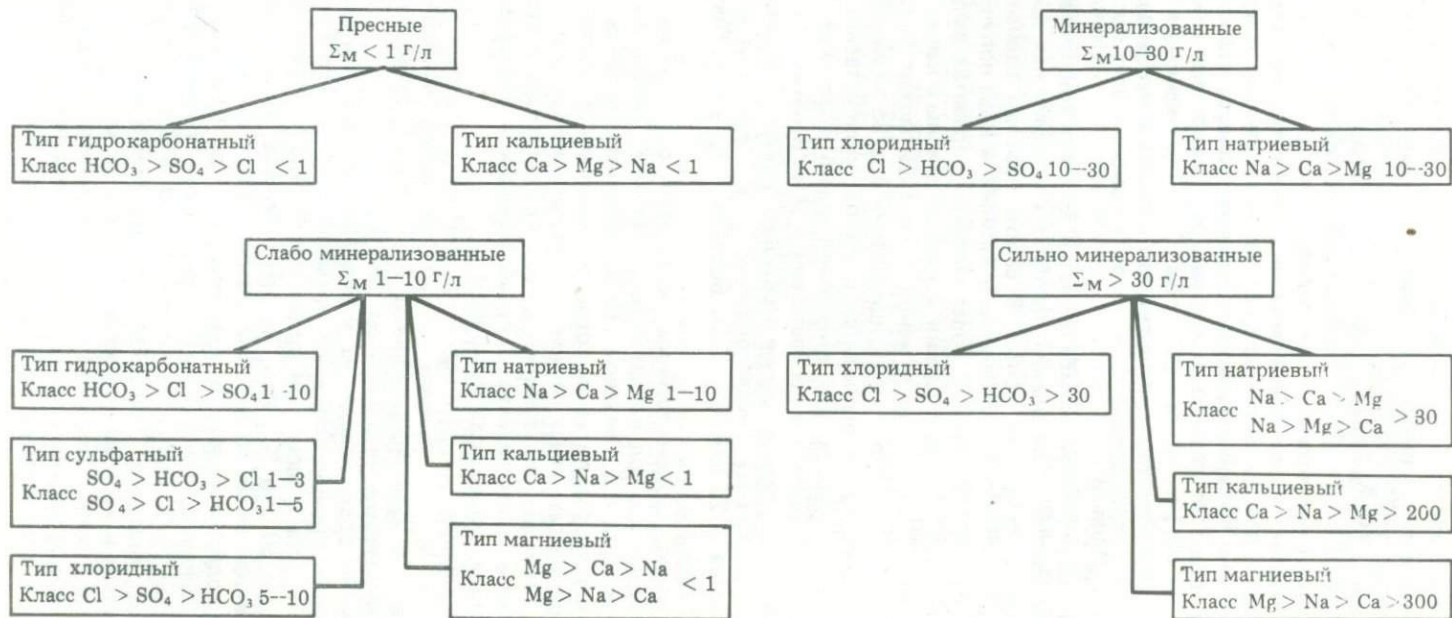


Рис. 1. Классификация подземных вод по степени минерализации с учетом ионного состава

и $Na > Ca > Mg$. Поэтому в практической работе достаточно именовать подземную воду по категории "группы"; например, в подземной воде конкретной скважины содержится $HCO_3 - 7$; $SO_4 - 2$; $Cl - 41$; $Ca - 9$; $Mg - 4$; $Na - 37$ экв %; формула состава воды Cl п. HCO_3 Na п. Ca .

1.1.2. Классификационные приемы общего типа

Классифицированием общего типа предусматривается систематизация разнообразных признаков и показателей, используемых при решении задач по охране геологической среды. Различаются систематизации нескольких видов; среди них наиболее существенны систематизации гидрогеохимических и геолого-гидрогеологических признаков и показателей.

Первые представлены: а) систематизациями гидрогеохимических антропогенных аномалий по особенностям их генезиса, форме, размерам, степени контрастности, характеру зональности и др.; б) систематизацией подземных вод антропогенного формирования по условиям и характеру массового обмена и массопереноса компонентов-загрязнителей; в) систематизацией миграционных систем, формирующихся в различных условиях под влиянием разных антропогенных факторов; г) систематизацией форм миграции в подземных водах компонентов антропогенного формирования и др.

Систематизации геолого-гидрогеологических признаков и показателей составляют несколько групп. Одна из них — систематизации геолого-гидрогеологических условий в целях прогнозной оценки изменения качества подземных вод под антропогенным воздействием различного характера: а) под влиянием загрязнения; б) под влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод; в) в районах строительства; г) в районах разработки полезных ископаемых и т.д. Вторая группа — систематизации пород: а) по литолого-минералогическому составу, определяющему характерные особенности физико-химических процессов между антропогенными компонентами и породами; б) по степени дисперсности, обуславливающей интенсивность сорбции компонентов-загрязнителей и обеспечивающей различную степень защищенности подземных вод от загрязнения; в) по фильтрационным свойствам, определяющим проникновение загрязнений в подземную воду и распространение загрязнений в подземной воде. Нередко проводится также типизация структурно-тектонических условий в целях прогнозной оценки степени влияния на подземные воды различных антропогенных факторов и выявляются гидрогеохимические особенности различных структурно-тектонических областей в целях оценки миграции компонентов антропогенного формирования.

Названные выше систематизации не составляют полный перечень. Необходимость в разного рода систематизациях при исследованиях в целях охраны геологической среды очень большая; в каждом конкретном случае характер систематизации определяется особенностями решаемых задач.

1.2. Решение гидрогеохимических задач с помощью статистических методов

1.2.1. Оценка качества гидрогеохимических материалов

Оценка качества гидрогеохимических, а также других (попутных) геолого-гидрогеологических материалов при исследованиях в целях охраны геологической среды имеет особое значение, так как поступающие в подземные воды инородные компоненты локализованы в пространстве и поэтому трудно обнаруживаются; они характеризуются своеобразием

проявления в подземных водах, что исключает возможность их обнаружения по аналогии с объектами естественного формирования.

Оценка качества гидрогеохимических материалов при исследованиях в целях геологической среды проводится посредством контрольного опробования скважин и других водопунктов изучаемого природного объекта, оценки достоверности уже имеющихся гидрогеохимических и прочих данных. Несмотря на самостоятельность названных двух путей оценки качества гидрогеохимических материалов, они взаимосвязаны, так как могут дополнять или уточнять друг друга.

В обоих случаях на качество гидрогеохимических материалов существенно влияет процесс получения гидрогеохимической информации. Этот сложный процесс включает в себя отбор и хранение проб, методику анализа химического состава подземных вод, передачу информации (окончательных результатов определений). На всех этих этапах возможны ошибки, искажающие истинные содержания компонентов в подземных водах.

Контрольное опробование подземных вод объекта — наиболее надежный способ оценки качества гидрогеохимических материалов. Оно заключается в повторном опробовании водопунктов на максимально возможное число компонентов подземных вод.

Выбор сети опробования и изучаемых компонентов производится исходя из конкретных задач исследования и характера природных условий территории исследования. При этом оценка качества гидрогеохимических и прочих материалов практически полностью зависит от плотности распределения по исследуемой территории пунктов наблюдения и количества определяемых компонентов. При контрольном опробовании объекта вероятность получения ошибочных данных невелика, что обеспечивается в этом случае полнотой сведений об условиях отбора, хранения проб воды и о методах и методике определения содержания в воде компонентов. При определении содержания в подземной воде компонентов необходимо иметь в виду, что химический анализ воды практически всегда производится с определенной ошибкой (погрешностью). Поэтому в исследованиях, связанных с оценкой качества гидрогеохимических материалов, необходимо добиваться максимально возможной точности химического анализа подземных вод. Оценка и контроль за качеством химического анализа подземной воды должны базироваться на вероятностно-статистических методах.

Для оценки достоверности уже имеющихся гидрогеохимических данных используется ряд статистических методов.

Одним из них является определение фоновых концентраций компонентов химического состава подземных вод и получение для них доверительных интервалов (см. 1.2.3). Это дает возможность выявить аномальные значения компонентов и на основании этого произвести их отбраковку.

1.2.2. Решение гидрогеохимических задач простейшими статистическими методами

При разработке гидрогеохимических проблем охраны геологической среды часто возникает необходимость пользоваться статистическими методами. К их помощи целесообразно прибегать при решении следующих гидрогеохимических задач: 1) сравнительного анализа химического состава подземных вод различных водоносных комплексов или разных участков одного водоносного комплекса, подверженных антропогенному влиянию; 2) анализа пространственного изменения концентрации компонентов в антропогенно измененных подземных водах; 3) выявления и оценки тесноты связей между компонентами антропогенно измененных подземных

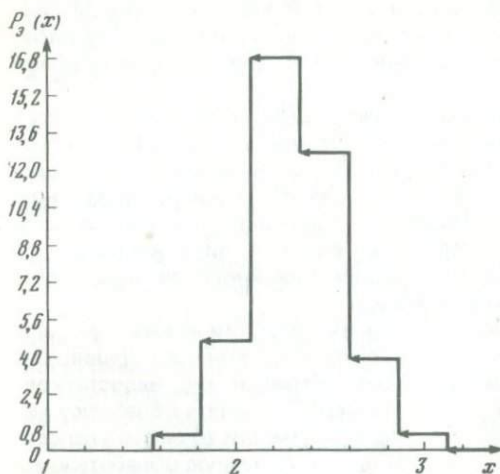
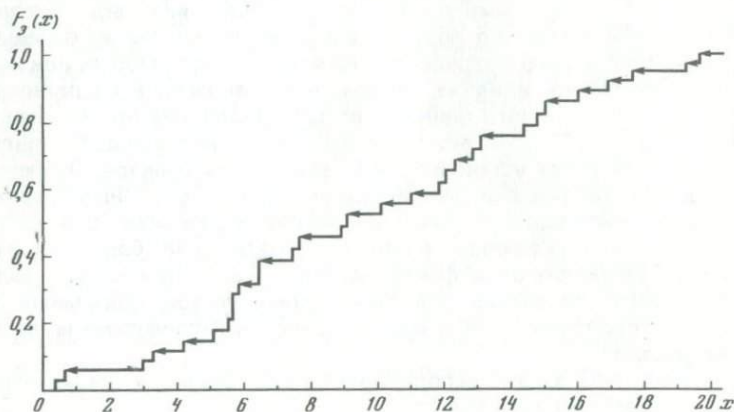


Рис. 2. Гистограмма частот встречаемости концентраций натрия в подземных водах

Рис. 3. Пример эмпирической функции распределения



Длина интервалов h определяется по формуле

$$h = \frac{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot 10}{n} \quad (2)$$

При достаточно большом количестве данных ($n \geq 100$) число интервалов k можно определять по формуле $k = 1 + 3,3 \lg n$, а длину интервалов h — по формуле

$$h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,3 \lg n} \quad (3)$$

Чтобы построить гистограмму, находят максимальное и минимальное значения компонента x в выборке; вычисляется h по формуле (2) или (3); вычисляются концы интервалов $x_{\min} + hm$, $m = 0, 1, \dots, k$; подсчитывается количество значений x_i , попадающее в каждый интервал; определяются значения $P_3(x)$ и изображаются на графике (рис. 2).

Эмпирической функцией распределения компонента x , построенной по

n известным значениям этого компонента x_1, \dots, x_n , является функция

$$F_3(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq x'_1, \\ \frac{1}{n}, & \text{если } x'_1 < x \leq x'_2, \\ \dots & \dots \\ \frac{k}{n}, & \text{если } x'_k < x \leq x'_{k+1}, \\ \dots & \dots \\ 1, & \text{если } x > x'_n, \end{cases} \quad (4)$$

где x'_1, \dots, x'_n — упорядоченные в порядке возрастания значения компонента x .

Для построения графика эмпирической функции распределения значения компонента x наносятся на ось абсцисс (при этом они автоматически располагаются в порядке возрастания). Определяются значения функции $F_3(x)$ с помощью формулы (4) и изображаются на графике (рис. 3).

Для анализа пространственного изменения концентрации компонентов в подземных водах используется общая гидрогеохимическая карта. На этой карте фиксируются участки подземных вод различного ионного состава и суммарной минерализации. Наиболее общие пространственные гидрогеохимические закономерности, выявляемые с помощью гидрогеохимической карты, представлены: а) заменой подземных вод одних геохимических групп другими: $\text{HCO}_3 \rightarrow$ (гидрокарбонатных) $\text{HCO}_3 \text{ SO}_4$ (гидрокарбонатно-сульфатными) $\rightarrow \text{SO}_4 \text{ HCO}_3$ (сульфатно-гидрокарбонатными) и др.; одних геохимических классов другими: $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl} \rightarrow \text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ и др.; одних геохимических типов другими: гидрокарбонатного сульфатным и др.; б) конкретной направленностью в увеличении суммарной минерализации подземных вод; в) качественной взаимосвязью между направленностью изменения ионного состава подземных вод и суммарной минерализации; г) конкретными интервалами суммарной минерализации подземных вод определенных геохимических групп, классов, типов.

Указанные закономерности, отображаемые на общей гидрогеохимической карте, могут быть дополнены показом распространения в подземных водах отдельных компонентов. Для этого строятся карты распространения компонентов в подземных водах в виде изолиний их концентраций. Они дают возможность конкретизировать изменение соотношений между компонентами при смене вод одних геохимических групп, классов, типов водами других групп, классов, типов, т.е. с их помощью можно довольно точно установить характер поведения компонентов в водах разного состава, который в различных условиях неоднозначен. Например, при смене вод гидрокарбонатного состава водами гидрокарбонатно-сульфатного, а затем сульфатно-гидрокарбонатного состава, хорошо фиксируемой на гидрогеохимической карте, поведение гидрокарбонат-иона относительно сульфат-иона может быть разным. Возможно увеличение содержания обоих ионов, но при этом возрастание содержания гидрокарбонат-иона будет отставать от увеличения содержания сульфат-иона. Возможен другой случай: содержание сульфат-иона будет увеличиваться, а гидрокарбонат-иона — уменьшаться. С помощью гидрогеохимической карты установить характер этих изменений не представляется возможным.

Карта же распространения компонентов в подземных водах в виде изолиний, как правило, дает точную характеристику особенностей размещения компонентов в водах, выявляет участки изменения соотношения между компонентами и т.д.

Карты распространения компонентов в подземных водах в изолиниях могут составляться традиционным путем, а также посредством нахождения трендовой поверхности. При традиционном подходе к составлению карт изолинии являются результатом интерполяции между пунктами с различными концентрациями компонентов в подземных водах на основе геолого-гидрогеологических условий исследуемой территории. Каждый из этих методов построения карт имеет свои особенности.

Одним из положительных моментов использования тренд-анализа для построения рассматриваемых карт является то обстоятельство, что применение этого метода позволяет учитывать возможную погрешность в значениях концентрации компонентов; при применяемом для построения таких карт методе линейной интерполяции значения концентраций компонентов предполагаются точными. Кроме того, применение тренд-анализа позволяет уменьшить влияние на общий результат построений "ошибочных" значений концентрации компонентов в локальных пунктах, если такие значения использовались для построения карты.

Карты, построенные с помощью тренд-анализа, отображают наиболее общие закономерности распространения компонентов.

Тренд представляет собой полином

$$\varphi(x, y) = \sum_{\substack{i+j \leq k \\ 0 \leq j \leq k}} \sum_{j=0}^k B_{ij} x^i y^j,$$

являющийся наилучшим среднеквадратическим приближением, найденным по известным значениям содержания компонента $f_1 = f(x_1, y_1), \dots, f_n = f(x_n, y_n)$ в пунктах опробования, координаты которых $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$.

Для этого полинома среднеквадратическая погрешность приближения

$$R(\varphi) = \sum_{i=1}^n [\varphi(x_i, y_i) - f_i]^2 \text{ минимальна.}$$

Этого условия достаточно, чтобы определить коэффициенты полинома

$$B_{ij}, 0 \leq i + j \leq k, 0 \leq j \leq k.$$

Они определяются из уравнений

$$\frac{\partial R(\varphi)}{\partial B_{i,j}} = 0, i, j = 0, 1, \dots, k, i + j \leq k \quad (5)$$

или из эквивалентных (5) уравнений

$$\sum_{\substack{i+j \leq k \\ 0 \leq i < k}} \sum_{j=0}^k B_{ij} \sum_{p=1}^n x_p^{i+1} y_p^{j+m} = \sum_{p=1}^n f(x_p, y_p) x_p^i \cdot y_p^m. \quad (6)$$

Решение системы уравнений (6) может проводиться методом Гаусса. В результате определяются коэффициенты полинома B_{ij} . Степень полинома $\varphi(x, y)$ выбирается из условия, чтобы $R(\varphi)$ не превосходила заданной погрешности приближения.

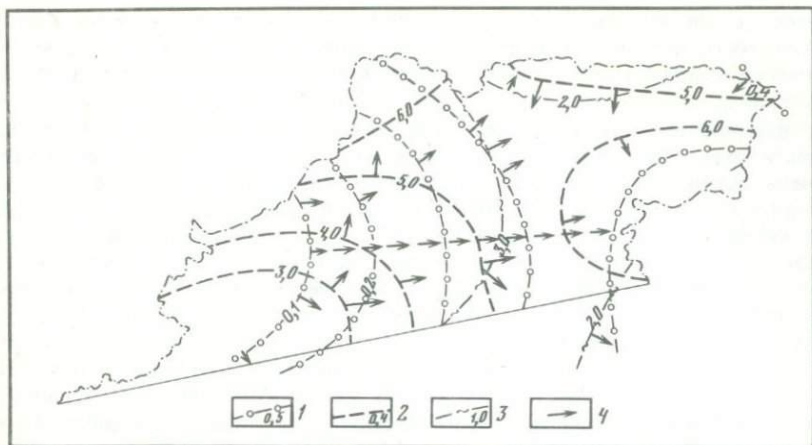


Рис. 4. Пример карты распространения в изолиниях Σ_M , HCO_3 , SO_4 подземных вод
 Изолинии: 1 — Σ_M , г/л; 2 — HCO_3 , мг-экв/л; 3 — SO_4 , мг-экв/л; 4 — направление
 увеличения Σ_M , SO_4 , HCO_3

Построение карт трендовой поверхности в изолиниях — трудоемкая операция, и ее рекомендуется проводить на ЭВМ.

Целесообразность составления наряду с общей гидрогеохимической картой карты распространения отдельных компонентов в подземных водах вытекает из нижеследующего примера. Так, на основании общей гидрогеохимической карты водоносного комплекса, сложенного терригенными с сульфидной минерализацией отложениями, одного из районов, расположенного в платформенных условиях с гумидным климатом, устанавливается переход подземных вод гидрокарбонатного состава в воды гидрокарбонатно-сульфатного, а затем сульфатно-гидрокарбонатного состава и одновременно отмечается возрастание суммарной минерализации. Но остается неясным характер изменения концентраций гидрокарбонат-иона на фоне увеличения абсолютных концентраций сульфат-иона, т.е. можно предполагать, что уменьшение содержания в водах гидрокарбонат-иона является абсолютной величиной или же содержание гидрокарбонат-иона, как и сульфат-иона, увеличивается, но в меньшей степени, чем сульфат-иона. Неясно также пространственное положение участков водоносного комплекса, в пределах которых подземные воды характеризуются тем или иным конкретным характером изменения концентраций гидрокарбонат-иона.

Из карты распространения ионов SO_4 и HCO_3 в подземных водах рассматриваемого водоносного комплекса (рис. 4) следует, что содержание первого возрастает от участка распространения гидрокарбонатных вод (запад-юго-запад территории) во всех направлениях параллельно увеличению суммарной минерализации. Поведение же гидрокарбонат-иона в подземных водах сложное: до определенного момента его содержание возрастает одновременно с возрастанием содержания сульфат-иона, а затем уменьшается. Таким образом, ограничиваются участки водоносного комплекса с уменьшением содержания в водах гидрокарбонат-иона в относительных и в абсолютных величинах.

Выявление и оценка тесноты связи между компонентами подземных вод необходимы для разграничения подземных вод на группы со специфиче-

4232



скими геохимическими свойствами, что имеет самостоятельное значение, а кроме того, используется для обоснования возможности последующего применения других статистических приемов. В пределах групп выделяются подгруппы, подземные воды которых характеризуются конкретным набором взаимосвязанных компонентов и конкретными численными их характеристиками. На более поздних этапах исследования решение рассматриваемой задачи часто имеет генетический смысл: наличие и теснота связи между компонентами используются для выводов об условиях формирования химического состава подземных вод и о степени влияния на формирование подземных вод антропогенных факторов. Для подземных вод разных генетических типов, выявленных качественно на основании изучения геолого-гидрогеологических условий, связи между компонентами могут достаточно сильно различаться, однако без применения корреляционного анализа это установить часто бывает трудно или невозможно. Поэтому количественные оценки связей между компонентами подземных вод с помощью корреляционного анализа могут способствовать более точному решению вопросов формирования химического состава подземных вод. Во всех случаях необходимым условием успешного проведения корреляционного анализа является предварительное обоснование с содержательной стороны (с гидрогеохимических позиций) возможных связей между рассматриваемыми признаками и характера их совместного изменения.

В математической статистике для целей выявления и оценки связей или характера совместного изменения компонентов в подземных водах служит коэффициент корреляции — показатель тесноты связи между парами компонентов x и y :

$$r_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

где x_1, \dots, x_n — значение компонента x ; y_1, \dots, y_n — значение компонента y ;

$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i/n$, $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i/n$. Причем $r_{x,y}$ измеряет "силу" предска-

ния значения одного компонента подземных вод по значениям другого, учитывая лишь линейную зависимость между переменными величинами.

Количественная оценка граничных условий подземных вод различного геохимического облика и определение значений одного компонента по показаниям другого проводятся регрессионным анализом.

С помощью кривых регрессий оказывается возможным оценить интервалы изменения суммарной минерализации для подземных вод геохимических групп, классов и типов и дать точную количественную оценку граничных условий по отдельным компонентам для геохимических групп, классов, типов.

В зависимости от сложности природных условий изучаемой территории используется линейная или нелинейная (квадратическая и т.п.) регрессия. Пусть значения компонентов x и y в n пунктах опробования равны $x_1, y_1; x_2, y_2; \dots; x_n, y_n$. Регрессией x на y является полином

$$\varphi(y) = a_0 + a_1 y + a_2 y^2 + \dots + a_k y^k, \quad (8)$$

для которого сумма квадратов отклонений значений полинома от значений

компонента x по всем точкам опробования

$$R(\varphi) = \sum_{i=1}^n [\varphi(Y_i) - x_i]^2 \text{ минимальна.}$$

Если $k = 1$, то регрессия x на y является линейной; если $k = 2$, то квадратичной и т.д.

Из условия минимальности $R(\varphi)$ находятся a_1, \dots, a_k — коэффициенты полинома $\varphi(y)$. Уравнения для нахождения коэффициентов следующие:

$$a_0 \sum_{i=1}^n Y_i^j + a_1 \sum_{i=1}^n Y_i^{1+j} + a_2 \sum_{i=1}^n Y_i^{2+j} + \dots + a_k \sum_{i=1}^n Y_i^{k+j} = \sum_{i=1}^n x_i Y_i^j, \quad (9)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, k.$$

Система линейных уравнений решается, например, методом Гаусса. Степень полинома определяется наибольшей допустимой погрешностью приближения.

Построение кривых регрессий целесообразно проводить на ЭВМ, так как уже при $k = 2$ сложно рассчитывать коэффициенты в системе уравнений.

На приведенном ниже примере видна целесообразность использования регрессионного анализа при гидрогеохимическом картировании. Так, кривые регрессий, выполненные для подземных вод водоносного комплекса, рассмотренного выше (пример построения карт изолиний), указывают на диапазоны суммарной минерализации, в пределах которых происходят значительные изменения в ионном составе подземных вод, а также уточняют поведение гидрокарбонат-иона и соотношение его с сульфат-ионом.

График регрессии компонентов на суммарную минерализацию подземных вод (рис. 5) показывает, что наиболее значительные изменения в ионном составе подземных вод (гидрокарбонатный тип меняется на сульфатный) наступают при суммарной минерализации около 1,0 г/л. Смена связана с уменьшением в водах по мере роста суммарной минерализации содержания гидрокарбонат-иона и с увеличением содержания сульфат-иона. В водах с суммарной минерализацией менее 1 г/л поведение гидрокарбонат-иона и соотношение его с сульфат-ионом более сложные. В диапазоне суммарной минерализации до 0,5 г/л содержание гидрокарбонат-иона, как и сульфат-иона, возрастает, но более существенно по сравнению с последним, поэтому воды принадлежат к классу $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$. В диапазоне с суммарной минерализацией 0,5–0,1 г/л содержание в водах гидрокарбонат-иона уменьшает-

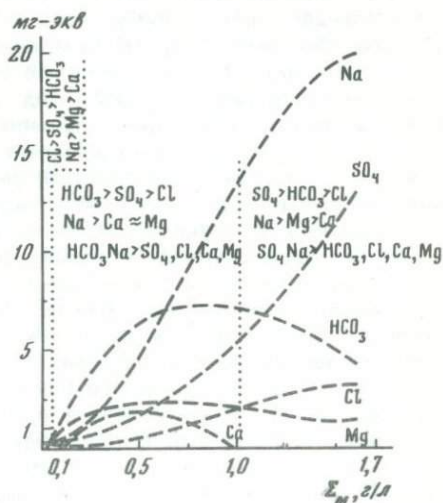


Рис. 5. График регрессии макрокомпонентов подземных вод на суммарную минерализацию

ся, но его количества при этом превышают количества сульфат-иона; в результате и в этом случае воды образуют класс $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$.

Задача определения значений одного компонента по показаниям другого решается в случае, если корреляционная зависимость между рассматриваемыми компонентами достаточно сильная. Для этих целей служит уравнение регрессии, которое описывает тенденцию совместного изменения изучаемых величин. Кривые регрессии позволяют прогнозировать значения одних компонентов по значениям других, что может способствовать экономии затрат на аналитические определения отдельных компонентов химического состава подземных вод.

Пусть $\varphi(y)$ — регрессия компонента x на компонент y . Тогда, имея некоторое значение компонента y , скажем y' , и подставляя его в уравнение регрессии (7), мы получаем прогнозируемое значение $x' = \varphi(y')$ компонента x .

1.2.3. Определение фоновых и аномальных концентраций компонентов в подземных водах

Определение фоновых и аномальных концентраций гидрогеохимических показателей и параметров при исследованиях в целях охраны геологической среды является важной и часто применяемой операцией. Она обязательна при выявлении местоположения гидрогеохимических аномалий, формирующихся под влиянием загрязнения, а также аномалий, возникающих при усиленной эксплуатации подземных вод, при разработке полезных ископаемых, при осуществлении различных инженерных мероприятий и др. Существенным подходом к выявлению аномальных концентраций антропогенных компонентов в подземных водах является содержательный анализ геолого-гидрогеологических условий и установление на его основании геохимического облика подземных вод исследуемого региона, включающего совокупность признаков или их отношений, отражающих минеральный, газовый, органический состав подземных вод, физико-химические параметры и другие, характерные для естественной обстановки данного региона. Подземные воды водоносного комплекса или горизонта, распространенные в конкретном регионе, обладают в естественных условиях определенным геохимическим обликом, свойственным только этому региону. Значения гидрогеохимических признаков (концентраций компонентов и пр.) в этом случае являются фоновыми, т.е. характеризующими химический состав подземных вод, сформировавшихся в естественных геолого-гидрогеологических условиях данного региона. Обнаружение повышенных концентраций компонентов в подземных водах или появление в водах посторонних компонентов указывает на возникновение условий, способствующих формированию гидрогеохимических аномалий. Такие условия часто являются результатом антропогенного влияния.

Установление фоновых и аномальных значений компонентов в подземных водах с помощью содержательного анализа носит по методологическому смыслу качественный характер. Более точно фоновые и аномальные значения компонентов в подземных водах устанавливаются с помощью методов математической статистики.

Наиболее целесообразно применять для выявления фоновых и аномальных концентраций компонентов в подземных водах два метода: 1) нахождение на основании статистических законов распределения фоновых концентраций компонентов для однородных гидрогеохимических объектов; 2) определение фоновых концентраций компонентов на основании тренд-анализа.

Нахождение фоновых значений концентраций компонентов в подземных водах на основании статистических законов распределения проводится в двух случаях: когда территория исследований неоднородна в геолого-гидрогеохимическом отношении или когда она однородна.

В первом случае нахождение фоновых значений концентраций компонентов в подземных водах представлено комплексом поэтапно выполняемых операций. Это следующие операции: 1) выделение в пределах изучаемой территории участков, статистически однородных по компонентному составу подземных вод; 2) установление закона распределения компонентов подземных вод на каждом выделенном участке; 3) оценка фоновых значений концентраций компонентов подземных вод каждого участка.

Выделение статистически однородных участков может проводиться как собственно гидрогеохимическими методами путем анализа гидрогеохимических карт при использовании представлений о генезисе химического состава подземных вод с учетом литолого-геохимических, структурно-тектонических и других особенностей исследуемой территории, так и статистическими методами.

Среди статистических методов для решения задачи разграничения территории на однородные участки наиболее часто используется анализ гистограмм распределения компонентов в подземных водах, факторный анализ и кластер-анализ. Хорошие результаты дает факторный анализ, а точнее *R*-метод факторного анализа.

Особенности *R*-метода, позволяющие успешно применять его в гидрогеохимических исследованиях, заключаются в следующем: 1) *R*-метод хорошо разработан математически и его пригодность для исследования природных явлений проверена на практике; 2) этот метод дает возможность рассматривать совокупность компонентов химического состава подземных вод, зависимых между собой, в отличие от других статистических методов; 3) указанный метод отличается от других статистических методов тем, что не только делает возможным отображение количественных свойств среды, но и дает приблизительную оценку рода процессов, влияющих на формирование гидрогеохимических условий; 4) *R*-метод позволяет уменьшать количество исходных данных в математическом отношении, приводя их к матрицам факторных нагрузок (свертывание информации).

В *R*-методе факторного анализа фактором называется вектор, компоненты которого получаются как произведения нормализованных компонентов собственного вектора корреляционной матрицы исходных данных на корень квадратный из соответствующего собственного значения. Вес фактора пропорционален вкладу в общую дисперсию. Факторные нагрузки (компоненты фактора) отражают вклад каждого признака в дисперсию, определяемую соответствующим фактором. Обычно число факторов задается меньше числа признаков исходных многомерных наблюдений, но в сумме они должны исчерпывать основную изменчивость всей системы. Последовательность факторов строго соответствует их вкладу в суммарную дисперсию.

В первый фактор входят признаки с высокими факторными нагрузками, дающие максимальную часть этой дисперсии; во второй фактор — признаки с высокими факторными нагрузками, как правило не коррелированные с первыми и исчерпывающие наибольшую часть из оставшейся дисперсии, и т.д. Если взять сумму произведений факторных нагрузок на стандартизованные значения признаков по каждому наблюдению, то мы получим значения проекций наблюдений на факторы. Анализ расположения точек проекций наблюдений в координатах факторов является основой для определения гидрогеохимического облика подземных вод. Подземным

водам, имеющим различный гидрогеохимический облик, будут соответствовать относительно изолированные компактные множества точек в факторном пространстве, что является основанием для разграничения территории на однородные участки. Точки проекций аномальных наблюдений окажутся либо на "краях" этих множеств, либо достаточно удаленными от них. Как правило, для подземных вод, обладающих единым гидрогеохимическим обликом, отвечающим гидрогеохимическому фону, статистический закон распределения признаков и его параметры остаются постоянными. Это дает возможность, опираясь на результаты факторного анализа, использовать для количественных расчетов различные многомерные и традиционные одномерные методы вычисления фоновых концентраций.

Установление законов распределения компонентов в подземных водах выявленных однородных участков проводится следующим образом. Формулируется гипотеза о законе распределения того или иного компонента химического состава подземных вод. Чаще всего в пределах выделенных однородных участков распределение компонентов в подземных водах оказывается нормальным или логнормальным.

Сформулированная гипотеза проверяется. Для проверки гипотез о нормальном и логнормальном законах распределения можно использовать статистические критерии хи-квадрат, критерий Колмогорова—Смирнова, критерий омега-квадрат.

Оценка фоновых значений концентраций компонентов в подземных водах проводится исходя из полученного закона распределения.

В случае, когда закон распределения компонента химического состава подземных вод является нормальным, оценка гидрогеохимического фона \hat{C}_Φ этого компонента соответствует среднеарифметическому содержанию его в подземных водах участка: $\hat{C}_\Phi = \bar{x}$, где $\bar{x} = \frac{(x_1 + \dots + x_n)}{n}$, x_1, \dots, x_n — значения содержаний исследуемого компонента; n — число определений.

Величина среднеарифметического содержания компонента в подземных водах всегда отличается от гидрогеохимического фона. Отклонение среднеарифметического от гидрогеохимического фона оценивается с помощью доверительного интервала. Доверительным $p\%$ интервалом для значения гидрогеохимического фона C_Φ является интервал

$$-T_{p,n} s + \bar{x} \leq C_\Phi \leq \bar{x} + T_{p,n} s.$$

где s — среднеквадратическое отклонение, которое вычисляется по формуле

$$s = \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1) \right]^{1/2}.$$

Значения $T_{p,n}$ находятся по табл. 1.

В случае, когда закон распределения компонента химического состава подземных вод является логнормальным, оценивается гидрогеохимический фон для логарифмов содержаний компонента. Оценкой гидрогеохимического фона \hat{C}_Φ логарифмов содержаний компонента является

$$\hat{C}_\Phi = \frac{\lg x_1 + \dots + \lg x_n}{n} = \lg \bar{x}.$$

Доверительным $p\%$ интервалом для значения гидрогеохимического фона

Таблица 1
Коэффициенты $T_{p,n}$

n	p								
	20	30	40	50	60	70	80	90	∞
0,99	2,845	2,750	2,677	2,66	2,66	2,647	2,638	2,631	2,575
0,95	2,086	2,042	2,021	2,008	2,00	1,994	1,99	1,986	1,96
0,9	1,724	1,697	1,683	1,675	1,67	1,666	1,664	1,662	1,64
0,8	1,325	1,310	1,303	1,298	1,295	1,293	1,292	1,291	1,28

логарифмов содержаний компонента является интервал

$$-T_{p,n} s_{lg} + \bar{lg} x \leq C_{\Phi} \leq T_{p,n} s_{lg} + \bar{lg} x,$$

где

$$s_{lg} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\lg x_i - \bar{x}_{lg})^2}{(n-1)} \right]^{1/2}, \quad \bar{x}_{lg} = \frac{\lg x_1 + \dots + \lg x_n}{n},$$

а значения $T_{p,n}$ находятся в табл. 1.

Аномальные концентрации компонентов в подземных водах определяются по тем значениям, которые не попадают в доверительный интервал для гидрогеохимического фона.

В случае, когда имеем дело с заведомо однородным в геолого-гидрогеохимическом отношении участком, решение задачи по определению гидрогеохимического фона компонентов подземных вод упрощается. Оно ограничивается установлением закона распределения компонентов в подземных водах участка и оценкой фоновых значений концентраций компонентов.

Определение фоновых концентраций компонентов подземных вод на основании тренд-анализа проводится в следующей последовательности: а) определяется тренд для компонентов химического состава подземных вод исследуемой территории, который является оценкой гидрогеохимического фона; б) строится доверительный интервал для гидрогеохимического фона.

Методика построения трендовой поверхности изложена в 1.2.2. В отличие от изложенного в данном случае предъявляются особые требования к выбору степени полинома: степень полинома должна быть такой, чтобы закон распределения разностей $\varphi(x_q, y_q) - f(x_q, y_q)$, $q = 1, 2, \dots, n$, оказался нормальным. Для этого находится полином $\varphi(x, y)$ степени $k = 1$ и разность $\varphi(x_q, y_q) - f(x_q, y_q)$. Если закон распределения разностей оказывается нормальным, то считается, что степень полинома установлена, если нет — степень полинома увеличивается на 1, т.е. $k = 2$, и т.д.

Оценкой гидрогеохимического фона C_{Φ} является трендовая поверхность $\varphi(x, y)$. Доверительным $p\%$ интервалом для значений гидрогеохимического фона в каждой точке (x_q, y_q) является интервал

$$\varphi(x, y) + \tilde{x} - T_{p,n} \tilde{s} \leq C_{\Phi} \leq \varphi(x, y) + \tilde{x} + T_{p,n} \tilde{s},$$

где

$$\tilde{x} = \sum_{q=1}^n [\varphi(x_q, y_q) - f(x_q, y_q)] / n,$$

$$\tilde{s} = \left(\sum_{q=1}^n [\varphi(x_q, y_q) - f(x_q, y_q) - \tilde{x}]^2 / n \right)^{1/2}.$$

1.3. МЕТОДИКА ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ В ЦЕЛЯХ ОХРАНЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

1.3.1. Методика гидрогеохимического картирования крупных территорий

Гидрогеохимическое картирование крупных территорий, проводимое в целях охраны геологической среды, предусматривает учет максимально возможного числа изменений в геологической среде, возникающих в связи с комплексным освоением этих территорий.

Оно включает ряд общих и специальных гидрогеохимических и геолого-гидрогеологических характеристик, позволяющих оценить пространственное положение подземных вод хорошего качества, вод со специфическими свойствами, ограничивающими их хозяйственное использование, и вод, отрицательно влияющих на окружающую среду.

Главной задачей рассматриваемого гидрогеохимического картирования является исследование распространения подземных вод с различным химическим составом, отражающим характер антропогенного влияния на геологическую среду, с одной стороны, и наличие гидрогеохимических условий, неблагоприятно сказывающихся на геологической среде, — с другой.

В подавляющем большинстве случаев при гидрогеохимическом картировании приходится иметь дело с территориями, характеризующимися сложным гидрогеохимическим строением, являющимся результатом одновременно естественных условий и деятельности человека.

Гидрогеохимическое картирование крупных территорий осуществляется в масштабах от 1 : 100 000 и мельче. Геолого-гидрогеологическая основа и рабочие варианты гидрогеохимических карт составляются в относительно более крупных масштабах (при картировании в масштабе 1 : 500 000 рабочие карты имеют масштаб 1 : 200 000 и т.д.).

Гидрогеохимическому картированию подлежат или территории распространения отдельных водоносных комплексов (горизонтов), или серии водоносных комплексов (горизонтов).

При картировании отдельного или серии водоносных комплексов, независимо от условий их залегания (грунтовые, напорные), гидрогеохимическая карта несет нагрузку, включающую следующие характеристики: 1) химический состав подземных вод; 2) распространение и мощность пресных подземных вод, а также слабоминерализованных вод; 3) распространение подземных вод со специфическими свойствами, ограничивающими их использование; 4) распространение загрязненных подземных вод; 5) расположение участков существенного влияния гидрогеохимических условий на инженерно-геологические, водно-физические свойства пород; 6) литологический состав пород; 7) основные гидрогеологические параметры.

Различие в гидрогеохимическом картировании отдельного и серии водоносных комплексов заключается в способах нанесения на гидрогеохимическую карту перечисленных характеристик, т.е. в техническом исполнении. Так, гидрогеохимическое картирование отдельного водоносного комплекса площадное; гидрогеохимические особенности с глубиной для отдельного водоносного комплекса показываются на профильном разрезе.

При картировании серии водоносных комплексов площадной прием картирования сочетается с картированием вертикального разреза. Картированием по площади охватываются водоносные комплексы в преде-

лах участков, где каждый из них является первым от поверхности. Одновременно по сочетанию всех исследуемых водоносных комплексов выделяются виды гидрогеохимических вертикальных разрезов и оконтуриваются районы, к которым они приурочены.

При площадном гидрогеохимическом картировании отдельного водоносного комплекса и серии водоносных комплексов в пределах участков, где каждый из них первый от поверхности, степень минерализации на карте изображается в изолиниях черного цвета. При картировании грунтовых вод и напорных водоносных комплексов зоны активного водообмена для изолиний степени минерализации принимаются градации 0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 3,0 г/л в случае их принадлежности к территориям с гумидным климатом и 0,5; 1,0; 1,5; 3,0; 5,0 г/л — с аридным климатом. Выбор градаций в обоих случаях обусловлен прежде всего практическими целями (использованием вод для водоснабжения, орошения и пр.), а также некоторыми генетическими соображениями (например, возможностью выпадения из подземных вод с суммарной минерализацией около 0,5 г/л карбоната кальция, с минерализацией от 2 до 3 г/л — сульфата кальция и т.д.).

При картировании напорных глубоких водоносных комплексов градации для изолиний степени минерализации подземных вод устанавливаются через равные интервалы, выбираемые с различной детальностью в зависимости от масштаба картирования.

Макрокомпонентный состав подземных вод картируется с помощью анионно-катионной характеристики, устанавливаемой на основании классификации вод по химическому составу. Как показано выше (1.1.1), целесообразно пользоваться классификацией, предложенной автором данной монографии. В соответствии с этой классификацией анионно-катионный состав подземных вод отдельного водопункта фиксируется в виде формулы. Макрокомпонентный состав подземных вод характеризуется одним, двумя или всеми тремя анионами и одним преобладающим катионом. Показ анионно-катионного состава вод в целом осуществляется посредством штриховки.

Для показа анионного состава используются линии вертикального направления разных знаков. Для показа катионов сохраняются линии тех же знаков, которые используются для показа анионов, но наклонных. Если в формулу анионного состава воды входят два или три аниона, линия главного (главных) аниона помещается слева; правее от нее располагаются линии второстепенных анионов. Катионный состав картируется по преобладающему катиону. В случае необходимости показа второстепенных катионов можно использовать крап.

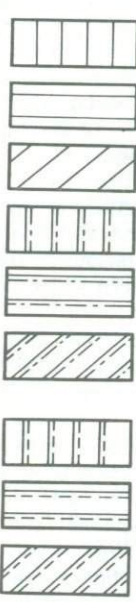
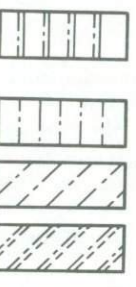

В табл. 2 приводится пример условных знаков, используемых для картирования анионно-катионного состава подземных вод.

Распространение пресных подземных вод ограничивается на карте изолинией суммарной минерализации в 1 г/л, слабоминерализованных — в 1,5 и 3 г/л. Мощность пресных подземных вод и подземных вод с минерализацией от 1 до 1,5 и от 1,5 до 3 г/л показывается на карте цветом (синим, голубым, светло-голубым).

К специфическим гидрогеохимическим показателям, ограничивающим использование подземных вод в практических целях, относятся: а) цвет, запах, вкус и другие физические свойства, а также содержание в подземных водах компонентов, не отвечающее ГОСТу на питьевую воду; б) распространение жестких и агрессивных подземных вод; в) распространение подземных вод с повышенным содержанием железа и других компонентов, неблагоприятных для питьевого и технического водоснабжения, мелиорации.

Таблица 2

Пример условных знаков, используемых для картирования анионно-катионного состава подземных вод

Условный знак	Тип воды	Класс воды	Группа воды	Формула состава	
	Гидрокарбонатный	$\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$	Гидрокарбонатная кальциевая	$\text{HCO}_3 \text{ Ca}$	
			Гидрокарбонатная магниевая	$\text{HCO}_3 \text{ Mg}$	
			Гидрокарбонатная натриевая	$\text{HCO}_3 \text{ Na}$	
			Гидрокарбонатно-сульфатная кальциевая	$\text{HCO}_3 \text{ SO}_4 \text{ Ca}$	
			Гидрокарбонатно-сульфатная магниевая	$\text{HCO}_3 \text{ SO}_4 \text{ Mg}$	
			Гидрокарбонатно-сульфатная натриевая	$\text{HCO}_3 \text{ SO}_4 \text{ Na}$	
			$\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$	Гидрокарбонатно-хлоридная кальциевая	$\text{HCO}_3 \text{ Cl Ca}$
				Гидрокарбонатно-хлоридная магниевая	$\text{HCO}_3 \text{ Cl Mg}$
				Гидрокарбонатно-хлоридная натриевая	$\text{HCO}_3 \text{ Cl Na}$
			Сульфатный	$\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$	Сульфатно-гидрокарбонатная кальциевая
Сульфатная кальциевая	$\text{SO}_4 \text{ Ca}$				
$\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$	Сульфатная натриевая			$\text{SO}_4 \text{ Na}$	
	Сульфатно-хлоридная натриевая			$\text{SO}_4 \text{ Cl Na}$	
	Хлоридный	$\text{Cl} > \text{HCO}_3 > \text{SO}_4$	Хлоридно-гидрокарбонатная кальциевая	$\text{Cl HCO}_3 \text{ Ca}$	
			Хлоридно-гидрокарбонатная натриевая	$\text{Cl HCO}_3 \text{ Na}$	
		$\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{HCO}_3$	Хлоридно-сульфатная натриевая	$\text{Cl SO}_4 \text{ Na}$	
			Хлоридная натриевая	Cl Na	

Эти показатели на карте фиксируются цветными фигурными границами, в пределах которых наносятся условные индексы жесткости, агрессивности, индексы микрокомпонентов и т.д.

Загрязнение подземных вод картируется применительно к трем его категориям: 1) промышленному; 2) сельскохозяйственному; 3) бытовому. Границы распространения загрязненных подземных вод проводятся на основании анализа воды с учетом данных о загрязнении подземных вод, о расположении промышленных объектов, о способах и местах утилизации отходов и пр. В случае отсутствия собственных фактических материалов о загрязнении подземных вод границы участков с загрязненными подземными водами основываются только на литературных и фондовых сведениях, а потому весьма ориентировочные. Показ загрязнения подземных вод, помимо площадного, может быть точечным.

Участки влияния гидрогеохимических условий на инженерно-геологические, водно-физические и другие свойства пород отражаются на карте крапом. При картировании крупных территорий гидрогеохимические условия, рассматриваемые с инженерно-геологических, водно-физических и других позиций, делятся на две категории. К первой относятся условия, способствующие формированию и развитию карбонатного, сульфатного и галогенного карста, а также условия, приводящие к уменьшению прочностных свойств пород; ко второй — условия, способствующие увеличению прочностных свойств карбонатных, сульфатных и других пород. В связи с этим подбирается серия значков крапа; для показа участков распространения карста используются общепринятые знаки.

Литологический состав водовмещающих пород картируется с учетом отражения на карте главных их минералогических особенностей, постседиментационных изменений, генезиса.

Литологический состав водовмещающих пород показывается на карте с помощью условных знаков, вмещаемых в масштабные вертикальные разрезы-колонки. Разрезы-колонки составляются для участков водонесного комплекса с отличительными чертами геолого-гидрогеологического строения и поэтому носят характер типовых. Пример литологических и минералогических условных знаков приведен в табл. 3, условных знаков постседиментационных изменений — в табл. 4.

Генетические комплексы представлены чаще всего морскими (m), аллювиальными (a), озерными (l), болотными (b), эоловыми (v), ледниковыми (g), озерно-ледниковыми (lg) и др.

Основными гидрогеологическими параметрами, учитываемыми при гидрогеохимическом картировании и отражающимися на карте, для грунтовых вод являются глубины их залегания и региональные гидродинамические условия, для напорных водоносных комплексов — региональные гидродинамические условия.

Глубины залегания грунтовых вод целесообразно картировать в изолиниях с градациями в 2, 5, 10, 20 м. В случаях, когда для построения изолиний недостаточно фактического материала, глубины залегания грунтовых вод фиксируются в виде участков с диапазонами величин. Граничными величинами диапазонов желательнее сохранять 2, 5, 10, 20 м. При мелкомасштабном картировании грунтовых вод со сложными условиями залегания допускается показ глубин их залегания в диапазонах 0—2, 0—5, 0—10 и 0—20 м.

Региональные гидродинамические условия грунтовых вод картируются посредством построения гидроизогипс и выделения областей инфильтрации атмосферных осадков, областей транзита грунтовых вод и областей их разгрузки путем дренирования долинами рек, котловинами озер и пр. (рис. 6).

Таблица 3

Пример условных знаков наиболее распространенных литологических и минералогических разновидностей пород







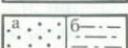

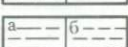

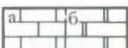
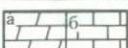

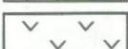

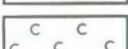


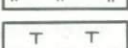

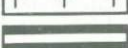

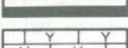
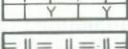
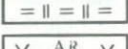
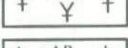
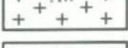









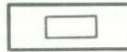


Литологическая характеристика	Минералогическая характеристика	
Терригенные породы		
 Пески	 Кварцевые	
 Супеси, суглинки	 Кварцево-полевошпатовые	
 Пески с гравием и галькой	 Полевошпатово-кварцевые	
 Пески, супеси, суглинки с галькой и валунами	 Полевошпатовые	
 а-песчаники, б-алеволиты	 Глауконитовые	
 а-глины, б-аргиллиты	 Фосфоритовые	
Карбонатные породы		
 а-известняки; б-доломиты	Глинистые породы	
 а-мергели; б-мел, гипс	 Гидрослюдистые	
 Сульфатные породы	 Хлоритовые	
 Галогенные породы	 Монтмориллонитовые	
 Кремнистые породы	 Каолинитовые	
 Современные болотные отложения	 Полиминеральные	
 Уголь и углефицированные породы	 Полимиктовые	
 Известковые туфы, гаж	 Известковые	
 Диатомиты		
 Метаморфические породы		
 Изверженные породы		
 Кислые		
 Средние		
 Основные		
 Ультраосновные		

Таблица 4

Пример условных знаков наиболее распространенных
постседиментационных изменений пород

Процессы	Породы и минералы
 Конкрециеобразование	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>Ca Кальцита</div> <div>Pr Пирита</div> <div>V Вивианита</div> <div>Fe Гидроокислов железа</div> </div>
 Растворение	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>h Галита</div> <div>ρ Гипса, ангидрита</div> </div>
 Выщелачивание	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>Ca Кальцита</div> <div>d Доломита</div> <div>Sr Сидерита</div> </div>
 Гидролитическое разложение	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>f Полевых шпатов</div> <div>P₁ ap Фосфатов (апатита, фторапатита, хлор-апатита)</div> <div>Fe Железистых минералов</div> <div>b Биотита</div> </div>
 Окисление	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>Pr Пирита</div> </div>
 Катионный обмен	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>ρl Глауконита</div> <div>mn Монтмориллонита</div> </div>
 Биогеохимические	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>C_{орг} Торфообразование</div> </div>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">SO₃</div> Газообразование	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>CO₂ Углекислого газа</div> <div>CH₄ Метана</div> <div>H₂S Сероводорода</div> <div>NH₃ Аммиака</div> </div>
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">* * *</div> Карстообразование	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div> Карбонатного</div> <div> Сульфатного</div> </div>

между суммарной минерализацией и ионным составом подземных вод, с одной стороны, и жесткостью, агрессивностью и прочими специфическими свойствами — с другой.

Пространственные гидрогеохимические закономерности выражаются в упорядоченном изменении в пределах водоносных комплексов суммарной минерализации подземных вод и анионного состава. Упорядоченное изменение суммарной минерализации подземных вод определяется общими для водоносных комплексов геолого-гидрогеологическими условиями и мало зависит от частных особенностей строения того или иного водоносного комплекса. К общим геолого-гидрогеологическим условиям прежде всего относятся региональные гидродинамические условия. Частные особенности строения водоносного комплекса нередко заключаются в разнообразии скоростей фильтрации подземных вод.

Изменения в анионном составе подземных вод зависят от литологических особенностей, а поэтому в каждом отдельном водоносном комплексе своеобразны. Так, например, в водоносном комплексе, сложенном терригенными отложениями, возможна смена гидрокарбонатных подземных вод хлоридными, а сложенном карбонатно-сульфатными отложениями — гидрокарбонатных вод сульфатными. В то же время в пределах каждого отдельно взятого водоносного комплекса изменения анионного состава подземных вод подчиняются той же упорядоченности, что и упорядоченность суммарной минерализации.

Взаимосвязь между суммарной минерализацией подземных вод и анионным составом проявляется количественно. Выяснено, что подземные воды того или иного анионного состава (конкретных гидрогеохимических типов, классов, групп) имеют вполне определенные пределы суммарной минерализации. Например, грунтовые и неглубокие пластовые воды нередко характеризуются следующими соотношениями анионного состава и суммарной минерализации: а) подземные воды класса $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$ — от менее 0,5 до 1 г/л; б) класса $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$ — от 0,5 до 3 г/л; в) подземные воды состава гидрокарбонатного (HCO_3) — менее 0,5 г/л, гидрокарбонатного с повышенным сульфат-ионом (HCO_3 п. SO_4) — от менее 0,5 до 1 г/л, гидрокарбонатно-сульфатного (HCO_3SO_4) — от 0,5 до 1 г/л, сульфатно-гидрокарбонатного (SO_4HCO_3) — от 0,5 до 1 и от 1 до 2 г/л, сульфатного с повышенным гидрокарбонат-ионом (SO_4 п. HCO_3) — от 2 до 3 г/л, сульфатного (SO_4) — более 2 г/л.

Подчиненность пространственных гидрогеохимических закономерностей региональным гидродинамическим условиям состоит в увеличении суммарной минерализации и изменении ионного состава подземных вод в направлении их движения. Региональные гидродинамические условия грунтовых вод строго подчиняются рельефу. Отсюда гидроизогипсы поверхности грунтовых вод с максимальными отметками оконтуривают области инфильтрации атмосферных осадков и приурочены к водораздельным пространствам; гидроизогипсы с минимальными отметками оконтуривают области разгрузки вод посредством дренирования понижениями в рельефе, гидроизогипсы с промежуточными отметками — области транзита подземных вод, приуроченные к склоновым частям водоразделов.

Следовательно, изолинии суммарной минерализации подземных вод с минимальными значениями должны повторять конфигурацию гидроизогипс поверхности грунтовых вод с максимальными отметками, с максимальными значениями — конфигурацию гидроизогипс поверхности вод с минимальными отметками, с промежуточными — конфигурацию гидроизогипс также с промежуточными отметками.

Исходя из рассмотренных взаимосвязей и взаимообусловленностей

пример смены подземных вод гидрокарбонатного типа водами сульфатного типа в направлении увеличения суммарной минерализации с гидродинамических позиций выглядит следующим образом.

Подземные воды грунтового водоносного комплекса с минимальной суммарной минерализацией, как правило, имеют гидрокарбонатный состав и приурочены к областям инфильтрации атмосферных осадков. Гидрокарбонат-ион этих вод начинает формироваться в почвенном слое, поэтому воды, поступающие в водоносный комплекс в областях инфильтрации из зоны аэрации, уже содержат существенные концентрации гидрокарбонат-иона. При достижении суммарной минерализации вод в направлении их движения 0,5–0,6 г/л из вод выпадают карбонаты кальция и магния; содержание гидрокарбонат-иона уменьшается. Содержание же сульфат-иона, поступающего в воду из водовмещающих пород практически во всех точках водоносного комплекса (например, при окислении сульфидных минералов) и образующего с катионами более растворимые, чем карбонаты кальция и магния, соединения (растворимость сульфата кальция около 2 г/л), с возрастанием суммарной минерализации в направлении движения подземных вод увеличивается.

Таким образом, площади распространения грунтовых вод гидрокарбонатного состава приурочены к областям инфильтрации (границы площадей повторяют границы этих областей), вод с относительно максимальными концентрациями сульфат-иона — к областям дренирования (границы тех и других близки), вод с промежуточными концентрациями сульфат-иона — к областям транзита (их границы повторяют границы областей транзита воды).

В случае, когда по тем или иным причинам в ходе гидрогеохимического картирования грунтовых вод невозможно составить гидродинамическую карту, при картировании суммарной минерализации и анионного состава можно ориентироваться на различные глубины их залегания.

В отличие от гидродинамических условий грунтовых вод гидродинамические условия напорных водоносных комплексов строго подчиняются структурному плану. Гидрогеохимическое картирование напорных водоносных комплексов проводится на структурной основе.

При картировании катионного состава подземных вод границы между участками водоносного комплекса с различным катионным составом корректируются по литолого-минералогическим характеристикам. Поэтому часто переход подземных вод одного катионного состава в воды другого состава резкий.

Гидрогеохимическое картирование серии водоносных комплексов, как отмечено выше, складывается из площадного картирования и картирования вертикального разреза. Картирование вертикального разреза производится посредством наложения и сравнительного анализа гидрогеохимических карт отдельных водоносных комплексов. В результате выделяются виды гидрогеохимических вертикальных разрезов и оконтуриваются участки, которые они занимают. Каждый вид гидрогеохимического вертикального разреза имеет определенное число этажей со своеобразными гидрогеохимическими условиями. Гидрогеохимические условия выделенных вертикальных разрезов характеризуются по тем же показателям, что и отдельные водоносные комплексы.

Оконтуривание участков распространения гидрогеохимических разрезов определенных видов осуществляется с помощью границ, в пределах которых помещаются типовые вертикальные колонки.

Границы подземных вод с суммарной минерализацией в 1 и 3 г/л на колонке фиксируются с помощью фигурных линий или линий разных знаков (например, пунктирной и пунктирной с точкой).

При гидрогеохимическом картировании подземных вод серии водоносных комплексов следует различать: а) картирование подземных вод напорных водоносных комплексов зоны активного водообмена; б) напорных водоносных комплексов погруженных частей артезианских бассейнов.

В первом случае оконтуриваются участки водоносных комплексов, в пределах которых данный комплекс на рассматриваемой территории является первым от поверхности. Подземные воды этих участков подлежат площадному картированию. На участках погружения водоносных комплексов подземные воды картируются с помощью характеристики вертикального разреза.

Картирование подземных вод серии напорных водоносных комплексов погруженных частей артезианских бассейнов осуществляется только с помощью вертикального разреза, помещаемого в пределах границ, оконтуривающих участки с характерными особенностями природных условий.

Во многих случаях при гидрогеохимическом картировании для получения литолого-геохимической и региональной гидродинамической характеристики составляются рабочие карты, с которых затем генерализованные характеристики переносятся на гидрогеохимические карты.

1.3.2. Особенности методики гидрогеохимического картирования территории городов

Гидрогеохимическое картирование территорий городов отличается от картирования крупных территорий: а) детальностью; б) широким представительством районов, в пределах которых большое влияние на формирование гидрогеохимической обстановки оказывают антропогенные факторы; в) выявлением гидрогеохимических аномалий антропогенного генезиса; г) установлением характера и местоположения антропогенного влияния на химический состав подземных вод; д) более точными прогнозными характеристиками изменения качества подземных вод и влияния гидрогеохимических условий на геологическую среду.

Гидрогеохимическое картирование территории городов — крупномасштабное, что связано с большой точностью исследований геологической среды в городских условиях, характеризующихся широким развитием разнообразных отраслей промышленности, различного рода строительства и т.д.

Крупномасштабным гидрогеохимическим картированием, проводимым на территории городов, предусматриваются и решаются в основном те же задачи, что и при мелкомасштабном гидрогеохимическом картировании; поэтому сохраняются в главных чертах нагрузка гидрогеохимической карты и картируемые элементы. Изменения нагрузки и картируемых элементов сводятся чаще всего к их расширению в связи с детализацией решаемых задач.

Так, та часть нагрузки гидрогеохимической карты, которая характеризует химический состав подземных вод, практически всегда при картировании территорий городов изменяется по суммарной минерализации. Изменения в картировании суммарной минерализации состоят в более подробном показе распространения подземных вод, обладающих различной минерализацией, или в использовании дополнительных градаций минерализации в связи с решением ряда специальных вопросов, таких, как миграция компонентов-загрязнителей, формирование равновесий в водах и др.

Вносятся изменения также в картирование катионного состава подземных вод; последнее, как правило, детализируется. Детализацией предусматривается увеличение числа картируемых катионов.

При характеристике литолого-минералогического состава водовмещающих отложений особое внимание при картировании территории городов обращается на постседиментационные процессы. Выявление по особенностям литолого-минералогического состава отложений таких процессов, как растворение и выщелачивание, приобретает наиболее существенную значимость в случае широкого развития в разрезе водоносных комплексов карбонатных пород, сульфатных пород или засульфаченных терригенно-карбонатных пород в связи с прогнозом карста.

Региональные гидродинамические условия территории городов являются сложными, а их исследование — очень трудная задача вследствие значительного нарушения в пределах городов естественного гидродинамического режима водоносных комплексов водоотбором. При значительном водоотборе во многих случаях сильно понижается уровень подземных вод, что резко изменяет соотношение и взаимосвязь между поверхностными и подземными водами. Области дренирования подземных вод, сформированные в естественных условиях, в нарушенных условиях часто становятся областями питания. При расположении водозаборов вблизи речных долин формируются участки инфильтрации в водоносный комплекс речной воды, что сопровождается опреснением подземных вод. Подток же в исследуемый водоносный комплекс вследствие усиленного водоотбора глубоко расположенных подземных вод вызывает, как правило, увеличение минерализации вод данного водоносного комплекса.

Участки поступления в водоносные комплексы посторонней воды могут быть на территории городов приурочены также к местам расположения промышленных предприятий, сбрасывающих большие объемы промстоков; последние иногда представлены практически пресной водой, не содержащей вредных примесей, и могут рассматриваться как области питания.

Таким образом, выполнение работ по выявлению региональных гидродинамических условий при гидрогеохимическом картировании городов требует учета числа, характера и местоположения водозаборов и различного рода предприятий. Важность точных знаний региональных гидродинамических условий при гидрогеохимическом картировании городов определяет необходимость составления рабочей гидрогеохимической карты как одной из обязательных основ выявления гидрогеохимических параметров. Гидродинамическая карта должна содержать подробные указания на очаги инфильтрации в водоносные комплексы атмосферных осадков, фильтрации поверхностных и других вод, пути транзита, участки разгрузки подземных вод и другие гидродинамические условия. При этом необходимо использовать комплекс специальных исследований (индикаторный, гелиевый, гелиево-третиевый методы и др.).

В качестве одного из существенных методов следует назвать изучение распределения в подземных водах гелия. Этот прием для гидрогеологических построений используется пока очень слабо; более широко он применяется в геологии для картирования зон разрывных нарушений. В последнее время появляются публикации, посвященные методике водно-гелиевой съемки и некоторым вопросам ее интерпретации в геологических целях [Яницкий, 1979; и др.].

Результаты водно-гелиевой съемки при составлении карт региональных гидродинамических условий можно применять для оценки вертикального перетекания подземных вод. Наиболее успешно можно фиксировать по данным водно-гелиевой съемки участки перетекания подземных вод в грунтовый и неглубокие пластовые водоносные комплексы, так как в этом случае следует ожидать существенные различия концентрации гелия

в подземных водах неглубоких и глубоких водоносных комплексов, затронутых глубинными разломами. Использование данных водно-гелиевой съемки в гидрогеологических целях основывается на положении о генезисе гелия в подземных водах. Подземные воды, содержащие гелий, составляют две группы. В одну входят подземные воды водоносных комплексов с любыми условиями залегания, гелий в которых является результатом распада радиоактивных веществ пород водоносных комплексов. Характерной особенностью подземных вод этой группы является возможное значительное колебание концентрации гелия в водах различных водоносных комплексов. Поэтому исследование закономерностей поведения гелия в подземных водах того или иного водоносного комплекса или их серии должно сопровождаться изучением пород как источников гелия для подземных вод. Аномальные концентрации гелия в водах могут указывать на гидравлическую связь между несколькими (двумя и более) водоносными комплексами.

Ко второй группе относятся подземные воды водоносных комплексов также с различными условиями залегания, но гелий которых имеет глубинное происхождение и поступает в пределы водоносных комплексов по разрывным тектоническим нарушениям. Главным признаком отнесения подземных вод к той или иной группе является различие в концентрации гелия в водах этих групп; как правило, концентрация гелия в подземных водах второй группы должна быть больше, чем в водах первой группы. В этом случае аномалии гелия в водах указывают на нарушение водоносного комплекса глубинными разломами.

Помимо установления участков вертикального перетекания подземных вод, водно-гелиевые данные могут быть использованы для выявления участков питания подземных вод поверхностными водами. Подземные воды на участках питания водами из рек и озер отличаются относительно малыми величинами содержания гелия.

Третий случай использования водно-гелиевых данных в гидрогеологических целях относится к уточнению с помощью их границ распространения областей инфильтрации в водоносные комплексы атмосферных осадков. Подземные воды этих областей должны характеризоваться также относительно низкими концентрациями гелия.

Наконец, с помощью гелиевых данных можно выявить на картируемой территории участки перетока подземных вод из одних водоносных комплексов в другие, возникающие в настоящее время вследствие образования между ними гидравлической связи при строительстве, разработках полезных ископаемых и т.д.

Картирование в пределах территорий городов специфических гидрогеохимических показателей, обуславливающих плохое качество подземных вод, требует учета ряда дополнительных по сравнению с мелкомасштабным картированием характеристик. Одной из очень важных дополнительных характеристик является характеристика подземных вод по содержанию свободной и других видов углекислоты; содержание углекислоты анализируется также для зоны аэрации. Необходимость детального изучения распространения углекислого газа в зоне аэрации и в подземных водах в пределах городских территорий связана с выявлением районов активизации карстообразующих процессов. В случае наличия карбонатных отложений в зоне аэрации или в пределах неглубоко залегающих водоносных комплексов повышенные концентрации углекислого газа с парциальным давлением CO_2 , превышающим атмосферное, способствуют развитию процессов углекислотного выщелачивания карбонатных отложений подземными водами. Повышенные концентрации углекислоты в подземных

водах на территории городов часто формируются в районах расположения различных отходов промышленных предприятий (отвалов, хранилищ и др.). Последние благоприятствуют возникновению почвенного слоя с перегноем, способствующего образованию биогенной углекислоты. Таким образом, картирование распространения в подземных водах городских территорий углекислого газа позволяет выявить участки развития на территории города карбонатного карста и их приуроченность к антропогенным объектам.

Второй дополнительной характеристикой, выявляемой при картировании территории городов, является характеристика компонентов, поступающих в подземную воду в виде загрязнений. Картируются состав компонентов-загрязнителей, пункты расположения источников компонентов-загрязнителей, участки распространения загрязненных подземных вод.

Гидрогеохимическое картирование территорий городов в целях охраны геологической среды требует особенно точного проведения различного рода границ и изолиний. Точность должна достигаться обоснованными логическими построениями, определяющими контрастность хода событий, обуславливающих положение той или иной границы или изолинии.

Глава 2

Гидрогеохимические исследования в связи с охраной подземных вод от загрязнения

2.1. Общие положения

Охрана подземных вод от загрязнения является одной из наиболее важных среди других видов охраны геологической среды, так как загрязнение подземных вод может проявляться регионально, распространяясь на значительные площади.

Отношение к понятию "загрязнения" подземных вод в настоящее время неоднозначное.

Загрязнение подземных вод, по нашему представлению, — это изменение в их химическом составе, вызванное поступлением в подземные воды посторонних для данной естественной среды веществ — отходов хозяйственной деятельности человека — и приводящие к ухудшению качества вод. К загрязнению нельзя относить изменения в химическом составе подземных вод, возникающие при полезной деятельности человека — хлорировании, йодировании, фторировании и др.

К загрязнению следует относить поступление в подземные воды загрязняющих компонентов в любых концентрациях, даже самых малых, так как само присутствие в подземных водах загрязняющих компонентов уже указывает на опасность их использования. В связи с нормами питьевого и технического водоснабжения следует различать загрязнение подземных вод в пределах норм и загрязнение, превышающее нормы.

Задачи гидрогеохимических исследований загрязнения подземных вод в общем виде составляют две категории — теоретические и практические, тесно взаимосвязанные друг с другом. Практические задачи часто определяются геолого-гидрогеологическими условиями конкретных объектов. Одна из центральных практических задач — прогнозная оценка распространения загрязнений в подземных водах.

Наиболее крупные теоретические задачи изучения загрязнения подземных вод следующие: 1) выявление источников загрязнения подземных вод; 2) выявление путей и условий переноса компонентов-загрязнителей от источников к подземным водам; 3) оконтуривание участков подземных вод, подверженных загрязнению; 4) выявление особенностей миграции компонентов-загрязнителей в подземных водах и других водно-миграционных системах; 5) установление форм миграции компонентов-загрязнителей в подземных водах и других водно-миграционных системах; 6) изучение природных и техногенных факторов миграции компонентов-загрязнителей; 7) исследование и качественно-количественный прогноз последствий загрязнения подземных вод; 8) районирование крупных и малых территорий в целях оценки степени изменения качества подземных вод при загрязнении. Каждая из названных задач при конкретном рассмотрении, как правило, детализируется.

Кроме того, в проблеме загрязнения существует ряд других задач, рассмотрение которых в каждом отдельном случае проводится или не проводится в зависимости от особенностей решения вопросов загрязнения для того или иного природного объекта. Так, например, при решении задач по оценке интенсивности загрязнения подземных вод возникает необходимость изучения соотношения техногенных и природных факторов. К техногенным факторам относятся значительные объемы производственных отходов и их утечка, большие потери сырья и готовой продукции, повышенные концентрации компонентов-загрязнителей в производственных и других отходах и наличие в них летучих компонентов, значительная загрязненность атмосферы и др. Основными природными факторами являются климатолого-геоморфологические и геолого-гидрогеологические. При изучении защищенности подземных вод от загрязнения возникает необходимость типизации отложений зоны аэрации по фильтрационным свойствам, выявления мощности слабопроницаемых отложений зоны аэрации и распространения "окон", способствующих инфильтрации загрязнений.

При изучении загрязнения подземных вод особое внимание должно быть сосредоточено на исследовании состояния загрязнения подземных вод на данный период и на качественно-количественном прогнозе изменения степени загрязнения подземных вод в пространстве и во времени. Качественный прогноз загрязнения подземных вод базируется на анализе геолого-гидрогеологических условий объекта предполагаемого загрязнения. Количественный прогноз загрязнения подземных вод требует строгой оценки миграционных параметров для компонентов-загрязнителей, разработки математической модели миграции и методов ее реализации.

Таким образом, гидрогеохимические исследования в целях охраны подземных вод от загрязнения включают многочисленные и разнообразные по содержанию задачи.

2.2. Техногенные предпосылки загрязнения подземных вод

2.2.1. Типизация загрязнений по составу и источникам

Подземные воды могут загрязняться химическими, бактериологическими, энергетическими (термическими и др.), радиоактивными и другими компонентами. В гидрогеохимии рассматривается загрязнение подземных вод главным образом химическими компонентами и в меньшей степени другими.

На планете наиболее распространено загрязнение подземных вод, свя-

занное с производственной и сельскохозяйственной деятельностью человека и с его бытом. В соответствии с этим выделяются три типа загрязнений подземных вод. Каждому типу загрязнений свойствен специфический набор компонентов-загрязнителей.

В отличие от загрязнения подземных вод бытовыми отходами и отходами сельскохозяйственной деятельности человека загрязнение отходами промышленных предприятий более разнообразно по составу, а сами отходы различны по фазовому состоянию.

Особое внимание обращено на: а) систематизацию компонентов-загрязнителей в соответствии с типами загрязнений, а также на более детальную их систематизацию по видам промышленных производств и сельскохозяйственной деятельности человека; б) систематизацию компонентов-загрязнителей по фазовому состоянию; в) группировку компонентов-загрязнителей в соответствии с частотой приуроченности к тому или иному роду хозяйственной деятельности человека.

Большое внимание уделяется изучению микрокомпонентов-загрязнителей. Каждый из видов отходов характеризуется специфическим набором микрокомпонентов; в целом ряде случаев один и тот же микрокомпонент входит в состав различных видов отходов (табл. 5).

Исследование микроэлементов для решения вопросов охраны подземных вод от загрязнения очень важно и потому, что часто небольшие концентрации микроэлементов в водах уже представляют собой загрязнение. В таких случаях микроэлементы являются первым сигналом антропогенного изменения состава подземной воды. Некоторые микроэлементы токсичны для живых организмов. Для человека наиболее токсичны Ag, Cu, Hg, Pb, Cr, Cd, Ni, W, B, As, F.

Промышленные отходы. Отходы промышленных предприятий по фазовому состоянию делятся на: 1) твердые; 2) жидкие; 3) газообразные; 4) смешанные.

К твердым отходам чаще всего относятся пустая порода, содержащая незначительные примеси добываемых компонентов, попутно извлекаемые и неиспользуемые полезные ископаемые горнодобывающей промышленности, а также отходы горно-обогатительной промышленности с сухим способом рудообогатения, шлаковые отходы металлургических заводов и теплоэлектростанций и некоторые другие.

Жидкие отходы — это отходы нефтехимической и нефтедобывающей промышленности, технологические воды машиностроительной и металлургической отраслей промышленности, воды пищевой промышленности — дрожжевых, пивоваренных, сахарных, картофеле-крахмальных заводов и др.

Газообразные отходы могут быть связаны с промышленным производством или с использованием промышленной продукции. Это газы свинца, фтора, газы алюминиевой промышленности, фосфатных заводов, керамического производства, фенолы коксовых заводов, сероводород, образующийся при ряде производств, газы целлюлозно-бумажного и коксового производств и газы, образующиеся при рафинировании нефти, при серном производстве.

Смешанные или двухфазные отходы представлены отходами, получающимися в виде пульпы при мокром способе рудообогатения, отходами многих металлургических и машиностроительных заводов, взвесьями содовых и содово-цементных предприятий.

Подземные воды особенно подвержены загрязнению компонентами отходов рудообогатительной, металлургической, химической, машиностроительной, нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной, горнодо-

Таблица 5
Данные по содержанию микроэлементов
в различных природных и антропогенных объектах

Микро-элементы	Жидкие коммунальные отходы, миллионная часть в сухом остатке	Фосфатные удобрения, мг/кг	Известки, мг/кг	Отходы животноводства, мг/кг	Химикаты для охраны растительности, %
As	2-26	2-1200	0,1-24	3-25	22-60
B	15-1000	5-115	< 10	0,3-0,6	
Ba	150-4000	< 200	120-250	270	
Be	4-13		< 1		
Br	20-165			16	20-85
Cd	2-1500	7-170	0,04-0,1	0,8	
Ce	20	20	12		
Co	2-260	1-10	0,4-3	0,3-6	
Cr	20-40600	66-245	10-15	55	
Cu	50-3300	1-300	2-125	2-60	12-50
F	2-740	8500-15500	300	7	18-45
Ge	1-10		0,2	19	
Hg	0,1-55	0,01-0,12	0,05	0,2	0,8-42
Mn	60-3900	40-2000	40-1200	30-550	
Mo	1-40	0,1-60	0,1-15	0,05-3	
Ni	16-5300	7-32	10-20	30	
Pb	50-3000	7-225	20-1250	15	< 60
Rb	4-95	5	3	0,06	
Sc	0,5-7	36	1	5	
Se	2-9	< 0,5	0,08-0,1	2,4	
Sn	40-700	3-4	0,5-4	3,8	
Sr	40-360	25-500	610	80	
Te		20-23		0,2	
V	20-400	2-180	20	45	
Zn	700-49000	50-1450	20-450	15-250	1,3-25
Zr	5-90	50	20	5,5	

бывающей, теплоэнергетической и металлообрабатывающей отраслей промышленности. Отходы этих отраслей практически все в качестве характерных компонентов содержат сульфат-ион. Но в целом состав отходов промышленных предприятий чрезвычайно разнообразен (табл. 6). Он складывается из минеральных и органических соединений, специфических компонентов с токсичными и нетоксичными свойствами.

По сочетанию компонентов-загрязнителей близкого состава отходы промышленных предприятий целесообразно разделить на пять групп.

В первую группу входят отходы, содержащие преимущественно неорганические вещества со специфическими свойствами. Это сточные воды химической промышленности, переработки неорганического сырья (содовые, сернокислотные, азотно-туковые заводы), предприятий черной и цветной металлургии, машиностроительной и металлообрабатывающей отраслей, фабрик обогащения черных и цветных металлов.

В районах их расположения возможно проникновение в подземные воды следующих компонентов: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} ,

Таблица 6
Примеры приуроченности компонентов-загрязнителей
к разным видам промышленных отходов

Отрасль промышленности	Аномальные физические, органолептические свойства, макрокомпоненты	Характерные микрокомпоненты
Химическая	Электропроводность, окисляемость, цвет, мутность, запах, жесткость, агрессивность Σ_M , SO_4 , Cl , HCO_3 , Na , K , Ca , Mg Соединения азота, фосфора Фенолы, детергенты и др.	As , B , Ba , Br , Cd , Cr , Cu , F , Fe , Hg , Pb , S , Se , Sr , Sn , Ti , Zn , V
Нефтеперерабатывающая	Органолептические свойства, продукты нефти, фенолы, SO_4	J , Br , B , Cd , Cr , Cu , Fe , Mn , Hg , Ni , Pb , V , Zn
Нефтедобывающая		Br , B , S , Li , Sr
Электротехническая		Be , Cd , Co , Cr , Cu , Hg , Mo , Ni , Ti , V , W , Zn
Металлургия железа	Cl , SO_4 , HCO_3 , CO_3 , Na , Ca , Mg	Fe , Mn , Cd , Co , Cr , Cu , Hg , Ni , S , Pb , Sn , Zn , Be
Металлургия цветных и тяжелых металлов		Sr , Ba , Zn , Cd , S
Обработка алюминия		F
Стекольная, цементная, керамическая		Cr , F , Ni , Cu , Co , Pb , Sr , Ba
Целлюлозно-бумажная	Органические кислоты, альдегиды, спирты, скипидар, H_2S , SO_4	Ba , Cr , Cu , Hg , Ni , Pb , Zn
Гальваническая	Цианиды	Ni , Pb , Cu , Cr , Cd , Fe
Добывающая и перерабатывающая соли и бораты	Σ_M , K , Na , Mg , Cl , SO_4	Br , B , Li
Атомная	Радиоизотопы	

NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Fe^{2+} , F^+ , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , As^{3+} , Mn^{4+} , Mo^{4+} , Ti^{4+} , W^{2+} , Hg^{2+} , Al^{3+} , Cd^{2+} , PO_4^{3-} , а также цианидов, сульфидов, роданидов, фенолов, дитиофосфатов, аминов, анилина, пиридина, формальдегида, бензола, нефтепродуктов, сероводорода.

Вторую группу составляют отходы, содержащие неорганические вещества без специфических свойств. Сюда входят стоки горнодобывающих, углеобогащительных, некоторых рудообогащительных предприятий (например, кварцевых и марганцевых руд). Их стоки представляют собой взвешенные минеральные вещества с несколько повышенной концентрацией макрокомпонентов, а также некоторых элементов, содержащихся в рудах. В подземных водах районов расположения этих предприятий возможно обнаружение Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- , I^- , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , а также нефтепродуктов.

К третьей группе относятся отходы, содержащие органические вещества со специфическими свойствами. Эту группу составляют сточные воды химических (например, органический синтез), коксохимических, газосланцевых, нефтеперерабатывающих, нефтехимических, целлюлозно-бумажных предприятий. Специфическими в них являются красители, смолы, фенолы, тетраэтилсвинец, дихлорэтан, синтетические жирные кислоты и спирты, нефтепродукты, ароматические углеводороды и ряд других органических и неорганических веществ, а также SO_4^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, Cl^- , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , Na^+ , Ca^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , H_2S и другие сульфиды.

В четвертую группу включаются отходы, содержащие органические примеси без специфических свойств; сюда входят сточные воды дрожжевых, картофеле-крахмальных, сахарных, пивоваренных заводов, скотобоев. Проникая в подземные воды, они способны существенно ухудшить качество воды, хотя и не делают ее токсичной в отношении здоровья человека. Химические компоненты загрязнения этой группы представлены гидрокарбонатными, карбонатными, сульфатными, хлоридными ионами; как правило, в них в повышенных концентрациях содержатся также натрий, кальций, магний, железо, марганец. В тех случаях, когда загрязнения этой группы, поступая в подземные воды, попадают в восстановительные условия, некоторые компоненты-загрязнители способствуют появлению в них жирных кислот, альдегидов, алкоголя, аммиака, сероводорода. Часто загрязненная отходами данной группы подземная вода имеет повышенную суммарную минерализацию, в ряде случаев увеличивается ее жесткость.

Пятую группу составляют радиоактивные отходы. Они поступают в подземную воду от ядерных электростанций, от заводов и институтов, которые в своей работе используют радиоактивные изотопы, а также вместе с промышленными отходами, образующимися при эксплуатации радиоактивных приборов. Наибольшую опасность радиоактивные отходы представляют в аварийных условиях. Последним подвержены места хранения изотопов, пути их транспортировки, а также места их эксплуатации.

Наиболее опасны для подземных вод загрязнения изотопами, характеризующимися следующими периодами полураспада: ^{90}Sr — 27,7 года; ^{89}Sr — 52,7 дня; ^{137}Cs — 30,0 лет; ^{134}Cs — 2,05 года; ^{144}Cs — 28 дней; ^{103}Ru — 39,5 дня; ^{106}Ru — 368 дней; ^{60}Co — 6,26 года; ^{131}I — 8,05 дня; ^{35}S — 87,1 дня.

Помимо перечисленных загрязнений, следует особо подчеркнуть опасность загрязнения подземных вод отходами горных разработок. Загрязнения подземных вод отходами горных разработок могут занимать большие площади. Значительную роль среди компонентов-загрязнителей играют сера, фосфаты. Характерно, что повышенные их концентрации в подземных водах во многих случаях формируются за счет безрудных отвалов с рассеянными компонентами.

Большое число специфических компонентов содержится в пылеватых частицах атмосферы — фенолы, F, Pb, H_2S , S. Наблюдается пылеватое засорение атмосферы хромом, медью, никелем, кадмием, цинком, а также железом, кальцием, магнием. Особенно следует обращать внимание на засорение атмосферы цианидом, хромом.

Бытовые отходы. В общем виде для бытовых отходов характерны повышенные концентрации NH_3 , NH_4 , H_2S , органических кислот, альдегидов, алкоголя, микроэлементов B, Cd, Hg, Cu, Pb, Zn, Cr, Ni.

Для всех бытовых отходов характерны также микроорганизмы. Последние создают угрозу, а в ряде случаев и непосредственно бактериальное загрязнение, вследствие которого в подземных водах могут распрост-

раняться вирусы и безвредные бактерии. Эти загрязнения чрезвычайно опасны, так как способны вызывать у человека и животных серьезные заболевания.

Для подавляющей части бытовых отходов характерны также нитросоединения, бензолы, масла, бензин, керосин и др.

Бытовые отходы, как и промышленные, по фазовому состоянию могут быть твердыми, жидкими и газообразными.

Для твердых бытовых отходов характерны в качестве главных источников загрязнения отвалы, мусорные городские и другие свалки. В определенных условиях серьезное загрязнение возможно в районах кладбищ. На отвалах и мусорных свалках содержатся городские отходы, макулатура, упаковка разных видов (бумажная, пластиковая, стеклянная, деревянная, металлическая), отходы в виде пепла, шлака и т.д.

Существует довольно много различных потенциально возможных ситуаций загрязнения подземных вод за счет твердых отходов, например, аварийные ситуации (рассыпание отходов при транспортировке, при плохом хранении и т.д.).

Количество твердых отходов для населенных пунктов с равным числом жителей примерно одинаково, но в конкретном выражении в значительной степени зависит от жизненного уровня и, по данным многих стран, меняется для крупных городов от 1 до 3 м³ в год на одного жителя.

При загрязнении подземных вод твердыми бытовыми отходами характер загрязнения часто определяется степенью и особенностями разложения отходов. Около 50% всех твердых отходов минерализуется и разлагается на простые и простейшие органические вещества, мигрирующие в подземных водах. Разложение твердых отходов происходит как непосредственно в отвалах и мусорных свалках, так и в окружающей их среде. Характер разложения и продукты разложения различны и зависят от окислительно-восстановительных условий. В окислительных условиях разложение отходов протекает быстро и в значительном числе случаев до конца. Продуктами разложения являются преимущественно углекислый газ и простые минеральные вещества. При полном разложении твердых бытовых отходов в окислительных условиях подземные воды обогащаются ионами Cl, SO₄, PO₄³⁺, Na⁺, K⁺, Fe²⁺, Mn²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NO₃⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻; повышается суммарная минерализация подземных вод, воды становятся жесткими. В воду могут попадать специфические субстанции, например селен. В воде появляется большое число аэробных бактерий. Разложение твердых бытовых отходов в окислительных условиях может вызвать повышение температуры среды, иногда значительное (до 80–100°C).

В восстановительных условиях разложение твердых бытовых отходов, как правило, не доходит до конца и подземные воды обогащаются промежуточными продуктами разложения. Это масла, алкоголи, альдегиды, жирные кислоты, CO₂, H₂, H₂S, NH₃, NH₂, S, сульфиды, N₂, NO₂, Fe²⁺, NH₄ и др. В подземные воды попадает большое количество анаэробных бактерий, микроорганизмов (дрожжевых, грибов и др.).

Жидкие бытовые отходы, коммунальные, по набору и характеру компонентов в значительной степени сходны с твердыми. Различие заключается в меньших количествах кальция и магния, что не способствует при загрязнении ими подземных вод формированию жесткости. Широко распространены жидкие бытовые отходы, носящие линейный характер и имеющие место главным образом в населенных пунктах городского типа. В геохимическом отношении они составляют две группы. Первая группа представлена бензином, маслами, керосином, нефтью и другими отхо-

дами транспортного хозяйства. Эти загрязнения попадают в подземную воду при неправильной эксплуатации транспорта. Большую неприятность доставляют различные аварийные случаи. Загрязнения бензином, нефтью, маслами захватывают иногда обширные участки. Вторая группа линейных загрязнений представлена хлористым натрием, попадающим в подземную воду вследствие использования соли в борьбе с гололедом: во время таяния снега и льда хлористый натрий проникает в подземные воды.

Помимо населенных пунктов, загрязнение подземных вод горючими веществами, маслами и хорошо растворимыми солями можно ожидать на значительной части автодорожных трасс.

Газообразные бытовые отходы образуются главным образом при сгорании угля, бензина и других горючих веществ. Они могут переноситься ветром на значительные расстояния от мест загрязнения и в подземные воды попадают с атмосферными осадками. Загрязнению подвержены главным образом грунтовые воды. Наиболее широко могут распространяться в подземных водах вследствие загрязнения газообразными бытовыми отходами такие компоненты, как HSO_4 , H_2SO_4 . Эти компоненты образуются в атмосфере за счет серы, которая при сгорании каменного угля дает SO_2 . Подземные воды, загрязненные HSO_4 и H_2SO_4 , становятся более кислыми. Кислые воды выщелачивают из почв кальций, фосфор, калий, железо, алюминий. Таким образом, загрязнение газообразными бытовыми отходами вызывает значительное изменение компонентного состава подземных вод.

Сельскохозяйственные отходы. Загрязнение сельскохозяйственными отходами может быть региональным и локальным.

Региональное загрязнение часто занимает большие площади. Оно связано главным образом с использованием в сельскохозяйственной практике минеральных удобрений, а также разнообразных препаратов для опыления растений, в том числе лесов. При распылении препаратов с самолетов создается потенциальная возможность загрязнения грунтовых вод.

Минеральные удобрения, используемые для улучшения сельскохозяйственной продукции, составляют в общем виде три группы: а) азотные; б) фосфорные; в) калийные. Но они могут быть и смешанными. Кроме того, удобрения каждой группы могут содержать добавки ряда макрокомпонентов (магния, кальция и др.) и микрокомпонентов (бора, железа, марганца и др.).

В целом в результате использования удобрений в подземные воды могут попасть азот, фосфор, калий, ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , PO_4^{3-} и др.

При употреблении калийных удобрений, представленных хорошо растворимым хлористым калием, в подземных водах может значительно возрастать концентрация хлора и в целом увеличиваться суммарная минерализация. В сельскохозяйственных районах возможно образование аммиачной и нитратной воды.

Органические удобрения способствуют формированию в подземных водах повышенных концентраций углекислоты, которая при наличии известковистых почв вызывает их углекислотное выщелачивание. Последнее обуславливает появление в подземных водах повышенных концентраций гидрокарбонат-иона и кальция; воды могут приобретать жесткость.

Препаратов для защиты растений много; существует большое их разнообразие — около 60 тыс. видов. Они делятся в общем плане на три группы относительно токсичности. В первую группу входят яды, во вторую — препараты, вредные для здоровья человека, в третью — неврядные для его здоровья.

Таблица 7
Приуроченность микроэлементов
к различным видам сельскохозяйственных отходов

Виды отходов	Микроэлементы
Химические удобрения	As, Cd, Cr, Cu, F, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn, Se, V, Ra-226
Фосфорные и азотные удобрения	P, Cd, F, Zn
Химикаты для охраны растений	Hg, Cu, As, Cd, Pb, Zn
Навозные удобрения	Cd, Cr, Cu, F, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn, Se, V

В результате использования этих препаратов в подземную воду могут поступать различные пестициды (гербициды, инсектициды и др.), гексахлоран, альдрин и др. Изменяются физические свойства подземных вод; они приобретают пеннистость, неприятные вкус, запах и др.

Локальное загрязнение может быть вызвано следующими причинами: 1) плохими условиями хранения минеральных удобрений, препаратов для защиты растений и др.; потерями их при транспортировке; хранением удобрений и препаратов в подземных хранилищах в сроки более продолжительные относительно норм; 2) наличием птицефабрик, птицеферм, животноводческих комплексов; 3) наличием хуторов с коровниками, птичниками, конюшнями, овчарнями и др. Все эти локальные загрязнения способствуют повышению концентрации в подземных водах Cl^- , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ ; может повышаться суммарная минерализация вод, достигая значительных величин. Загрязнения могут охватывать значительные площади.

Отходы сельского хозяйства содержат большое число микроэлементов. Они составляют четыре характерные группы (табл. 7).

2.2.2. Систематика путей поступления загрязнений в подземные воды

Рассмотрение путей поступления загрязнений в подземные воды связано с выяснением целого ряда вопросов, раскрывающих характер очагов возможного загрязнения подземных вод.

В связи с этим изучаются условия расположения очагов загрязнения подземных вод на земной поверхности, особенности их строения (фильтрационные свойства отходов в отвалах и пр., минералогический состав твердых отходов и их геохимическая устойчивость, строение прудов-накопителей и др.), инфильтрационные и другие пути поступления загрязнений в подземные воды, систематизация путей загрязнений подземных вод относительно длительности и сезонности их действия и др.

Очаги загрязнения по условиям положения на поверхности земли делятся на три группы. Это атмосфера, поверхностные водотоки и водоемы, отходохранилища.

Атмосфера часто содержит разного рода загрязнения в виде пылеватых частиц и газов. Особенно большой процент пылеватых загрязнений отмечается в атмосфере в районах размещения промышленных предприятий и в пределах крупных городов. Значительны загрязнения атмосферы также над удобряемыми полями и над участками земли, защищаемыми от вредителей. Состав загрязнений атмосферы разнообразен; в различных районах он соответствует характеру источников компонентов-загрязнителей, связан-

ных с промышленным производством, обработкой сельскохозяйственных полей, защитой растений и др. (2.2.1)

Однако особенно широко распространено загрязнение различными видами серы. В большинстве атмосферных осадков Западной Европы и других стран преобладающим компонентом серного загрязнения является сульфат-ион. В землю пылеватые загрязнения и газы попадают с атмосферными осадками. Часто загрязнения попадают в подземные воды с атмосферными осадками вблизи источников загрязнения и отражают характер загрязнения в данном регионе. Например, гидрогеохимические аномалии, характеризующиеся повышенными концентрациями в водах сульфат-иона, расположены в грунтовых водах вблизи фабрик и заводов, которые в виде эксгальций поставляют в атмосферу значительные количества SO_3 . Эти аномалии, как правило, имеют эллипсоидальную форму, что отражает влияние на их форму направления ветра. При наличии ветров значительной силы атмосферные загрязнения могут переноситься на большие расстояния и вызывают загрязнения подземных вод, не свойственные данному региону.

В отличие от многих наземных очагов загрязнений компоненты-загрязнители атмосферы более рассредоточены в пространстве, вследствие чего и загрязнения ими подземных вод охватывают нередко большие площади. В количественном отношении эти загрязнения не ярко выражены, чаще всего они малы, но не всегда.

Водотоки и водоемы (реки и небольшие речки, озера, пруды и др.) загрязняются больше всего в районах населенных пунктов и промышленных предприятий. Характер загрязнений отдельных водотоков и водоемов чаще всего своеобразный, соответствующий в целом тому или иному промышленному или сельскохозяйственному региону.

Загрязнение водоемов и водотоков к настоящему времени, несмотря на строжайшие меры, принимаемые в отношении очистки сточных вод, имеет значительные размеры.

Многие реки земного шара в результате сбрасывания в них жидких отходов промышленных предприятий, бытовых отходов и загрязненных сельскохозяйственным производством вод превращены в грязные сточные каналы, вода которых малопригодна, а в ряде случаев совсем не пригодна для пользования.

В результате осуществляемых мер по очистке промышленных отходов угроза загрязнения водоемов и поверхностных водотоков уменьшается. С каждым годом возрастает число очистных сооружений. Принимаются меры к улучшению технологии производства. Большие средства затрачиваются на очистку вод промышленных предприятий в СССР. В 1966–1970 гг. в эксплуатацию было введено более 8 тыс. очистных сооружений.

Несмотря на принимаемые меры, угроза загрязнения подземных вод через воды поверхностных водотоков и водоемов сохраняется.

В районах платформенных областей с гумидным климатом, а также в районах горно-складчатых областей и кристаллических массивов, где преобладает дренирование поверхностными водами подземных, поверхностные воды могут поступать в подземные в период половодья. При этом очень опасны малые, но сильно загрязненные речки. В случае развития подземных вод трещинного типа изменение их качества происходит даже на расстоянии нескольких километров от реки.

Отдохохранилища разнообразны; это отвалы, хвостохранилища, шламохранилища и др.

Отвалы — это места складирования твердых отходов. Различают золоотвалы, солеотвалы и др. Хвостохранилища и шламохранилища служат для складирования двухфазных (твёрдо-жидких) отходов; это отходы главным

образом горнорудной, металлургической, угольной, отчасти машиностроительной промышленности и др.

Загрязнения от отвалов, хвостохранилищ и шламохранилищ поступают в подземные воды преимущественно с атмосферными осадками. Степень обогащения атмосферных осадков компонентами-загрязнителями определяется фильтрационными свойствами материала, слагающего отвалы, а также устойчивостью материала к разложению атмосферными осадками.

Фильтрационные свойства материала хранилищ определяются гранулометрическим составом отходов, который зависит от технологических особенностей производства. Чаще всего материалы отвалов, хвостохранилищ и шламохранилищ по гранулометрическому составу делятся на группы: 1) гравелистые (более 25% составляют частицы крупнее 2 мм); 2) крупнозернистые (более 50% составляют частицы от 0,25 до 2 мм); 3) мелкозернистые (более 75% составляют частицы от 0,1 до 0,25 мм); 4) пылеватые (более 75% составляют частицы менее 0,1 мм). Коэффициенты фильтрации находятся в пределах от 1 м/сут и менее до 50 м/сут и более.

В пределах отвалов, хвостохранилищ и шламохранилищ частицы с различным диаметром обычно имеют довольно строгое размещение, особенно по вертикальному разрезу. Внизу располагаются преимущественно наиболее мелкие частицы, выше размер частиц возрастает.

Очень важным является выявление закономерностей распределения в пространстве (по площади и вертикальному разрезу хранилища) плотности упаковки частиц. Чаще всего с глубиной плотность упаковки частиц увеличивается. На примере ряда хранилищ отмечено, что степень уплотнения частиц максимальна вблизи земной поверхности. Площадное размещение в пределах хранилищ участков с различной плотностью упаковки частиц отходов в каждом конкретном случае определяется способом намыва отходов.

Минералогический состав отходов, складываемых в отвалы, хвостохранилища и шламохранилища, определяется минералами промышленного значения и флотореагентов. Среди минералов промышленного значения значительное место занимают медь, никель, свинец, цинк, молибден, кобальт, железо, марганец и др. Флотореагенты содержат фенолы, фосфаты и др. В процессе обогащения руд возможно образование новых соединений (роданидов, цианидов, меди, цинка и др.). Из макрокомпонентов для хвостохранилищ характерен сульфат кальция, так как в технологии многих производств используется серная кислота и известь.

Места складирования и хранения жидких отходов промышленности известны как пруды-накопители, пруды-отстойники, "белые моря" и др. В них складываются стоки предприятий содовой, содово-цементной, нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, химической, целлюлозно-бумажной, галлургической промышленности и ряда отраслей пищевой индустрии.

Пруды-накопители и отстойники почти всегда содержат, помимо жидких, твердые отходы в виде шламов или концентрированных химических соединений, иногда токсичных.

По воздействию на подземные воды хранилища жидких отходов можно разделить на две группы.

Для хранилищ одной группы характерны однородность твердой части отходов по фильтрационным свойствам (последние представлены плотной массой), затрудненная фильтрация через твердую часть отходов жидких стоков, значительная растворимость твердых отходов атмосферными осадками, для другой — инфильтрация через твердые отходы атмосферных осадков, слабая растворимость твердой части отходов атмосферными осадками, площадная неравномерность интенсивности растворения твердых

отходов атмосферными осадками и инфильтрации загрязненных атмосферных осадков в зону аэрации.

К особенностям перемещения загрязнений к водоносным комплексам относятся разнообразие инфильтрационного перемещения (загрязненных поверхностных вод, непосредственно жидких отходов, загрязненных атмосферных осадков) и разнообразие путей поступления загрязнений в инфильтрующиеся воды (из мест плохого хранения, в аварийных ситуациях, при газообразном и пылеватом загрязнении и т.д.).

Особые случаи поступления загрязнений в подземные воды связаны с плохим выполнением гидрогеологического бурения, когда в воды попадают буровые и другие растворы, которыми пользуются при цементации скважин и их кислотной обработке, а также с подземным выщелачиванием полезных ископаемых.

По длительности действия пути поступления загрязнений в подземные воды делятся на постоянно действующие, периодически действующие и случайные.

Они неодинаковы в различных в климатическом отношении районах. Прямая инфильтрация жидких загрязнений в подземные воды в районах с полуаридным и аридным климатом может быть отнесена к постоянно действующим путем, в районах многолетней мерзлоты — к периодически (сезонно) действующим, в районах с гумидным климатом — к постоянно, но неравномерно действующим в зависимости от времени года (более интенсивна она в весенне-летне-осенний период).

Инфильтрация загрязнений в подземные воды с атмосферными осадками может быть в одних случаях только сезонной, следовательно, периодического действия независимо от климатических условий (большинство видов сельскохозяйственного загрязнения), в других случаях она приближается к постоянно действующим путям загрязнения (остальные виды загрязнения).

Случайное поступление загрязнений в подземные воды связано с утечками сырья и готовой продукции, с аварийными ситуациями (прорывами нефтепроводов и др.), с действием заброшенных скважин и т.д.

Поступление загрязняющих компонентов в подземные воды может осуществляться непосредственно или через зону аэрации. Поступление загрязняющих компонентов непосредственно в подземные воды наблюдается при перетоках в них загрязненных поверхностных вод из водотоков и водоемов, а также при перетоках через искусственные выработки и карстовые каналы, достигающие подземных вод.

Наиболее широко распространенными условиями поступления загрязняющих компонентов в подземные воды являются условия фильтрации через зону аэрации. Поэтому очень важно исследование фильтрационных свойств пород, слагающих зону аэрации, их минералого-геохимических особенностей, взаимоотношения зоны аэрации с грунтовыми и пластовыми водами.

Загрязнению подвержены все подземные воды: верховодка, грунтовые воды, пластовые воды в пределах артезианских структур. Чаще загрязнению подвергаются верховодка и грунтовые воды. Пластовые воды загрязняются обычно в пределах тех участков, где данный водоносный комплекс залегает первым от поверхности, имеет безнапорный характер и прикрыт маломощными четвертичными отложениями. Пластовые воды, залегающие под серией других водоносных комплексов, как правило, слабо подвергаются загрязнению.

Пути поступления загрязнений в подземные воды могут быть площадными (региональными) или линейными и точечными. К точечному загрязнению относятся загрязнение, возникающее в аварийных случаях, при бурении скважин, и некоторые другие.

2.3. Факторы и процессы распространения загрязнений в подземных водах

2.3.1. Миграционные системы и внутренние факторы миграции

Поступление компонентов-загрязнителей в подземные воды, как правило, значительно отражается на их химическом составе. При этом химический состав подземных вод претерпевает изменения как за счет добавок посторонних загрязняющих их веществ, так и вследствие преобразования окислительно-восстановительных, щелочно-кислотных и других равновесий. В условиях загрязнения поведение компонентов-загрязнителей в подземных водах, их распространение в пространстве и во времени определяются сочетанием свойств компонентов-загрязнителей и природных факторов и описываются процессами миграции.

Процессы миграции осуществляются в миграционных системах, включающих природные подземные воды и компоненты-загрязнители. Компоненты-загрязнители могут находиться в миграционных системах в твердой, жидкой и газообразной фазах. В связи с этим простейшие миграционные системы, возникающие при загрязнении подземных вод, следующие: "подземная вода — жидкие загрязняющие вещества", "подземная вода — твердые компоненты-загрязнители", "подземная вода — газообразные компоненты-загрязнители". Каждая из названных систем имеет сложное строение и делится более детально на множество частных миграционных систем. Это связано прежде всего с особенностями состава компонентов-загрязнителей и с особенностями гидрогеохимической среды естественного формирования, т.е. гидрогеохимической среды водоносного комплекса или горизонта, подвергающегося загрязнению. Необходимость выделения более дробных миграционных систем вызвана также влиянием на миграцию компонентов-загрязнителей пород, природных органических веществ, газов и др. Поскольку загрязнению подвержены главным образом подземные воды грунтового водоносного комплекса или напорные воды зоны активного водообмена, то в формировании миграционных систем часто принимают участие почвенные органические вещества и атмосферные газы. В целом под влиянием антропогенных факторов может возникнуть большое число миграционных систем загрязнения, в основе которых лежит сочетание из элементов естественного формирования и загрязнения. Наиболее часто встречаемыми сочетаниями из элементов естественного формирования являются "подземная вода — порода", "подземная вода — порода — газ", "подземная вода — порода — газ — органическое вещество". В ходе загрязнения к каждому из этих сочетаний может причлениться один или несколько компонентов-загрязнителей. С учетом состава компонентов-загрязнителей и их фазового состояния возможно возникновение нескольких десятков миграционных систем загрязнения.

Внутренние факторы миграции компонентов-загрязнителей представлены структурными особенностями водных растворов и геохимическими свойствами компонентов-загрязнителей.

В настоящее время широко распространено представление о структуре воды как о жидком теле с водородными связями. Водородные связи обуславливают наличие пустот, а следовательно, рыхлость воды; с другой стороны, они способствуют упорядоченному расположению молекул воды, что приближает воду к твердому телу. При температурах, превышающих $+200^{\circ}\text{C}$, молекулы воды приобретают плотную упаковку и теряют водородные связи.

Молекулы воды и ионы растворенных веществ совершают скачкообразное движение по пустотам в структуре воды. Энергию, необходимую для

перемещения и отрыва от соседних молекул и ионов, они накапливают вследствие теплового колебания около временных положений равновесия. Влияние структуры водных растворов особенно значительно сказывается на миграции компонентов-загрязнителей, участвующих в сорбционных процессах.

К основным геохимическим свойствам компонентов-загрязнителей, обуславливающим особенности их миграции, относятся валентность, ионный вес, ионный радиус. Эти свойства определяют степень растворимости соединений компонентов-загрязнителей, формы нахождения компонентов-загрязнителей в подземных водах, регулируют их участие в конкретных физико-химических процессах, обуславливают пространственное положение подземных вод с тем или иным конкретным набором компонентов-загрязнителей.

Зависимость водной миграции компонентов-загрязнителей от валентности определяется исходя из того, что, чем больше валентность компонента, тем прочнее он удерживается в составе пород или твердых отходов, тем слабее переходит в подземные воды, а следовательно, тем меньше его водная миграция, т.е. тем слабее протекают процессы перевода компонентов-загрязнителей из твердых отходов и процессы переноса их подземными водами. Примеры рядов водной миграции и интенсивности перевода в воду макрокомпонентов: K^+ , Na^+ > Ca^{2+} , Mg^{2+} и Cl^- > SO_4^{2-} , CO_3^{2-} ; микрокомпонентов: Li^+ > Ba^{2+} > Fe^{3+} . Интенсивность протекания сорбционных процессов (адсорбции, ионного обмена) определяется степенью удерживания компонентов породой, вследствие чего она сильнее компонентов-загрязнителей с большей валентностью. Интенсивность протекания процессов образования и выпадения из подземных вод слабо растворимых соединений в виде твердых осадков, как и сорбционных процессов, тем сильнее, чем больше валентность компонентов-загрязнителей, образующих соединения. Чаще выпадают из подземных вод вещества, образуемые двух- и трехвалентными компонентами-загрязнителями, — карбонаты кальция и магния, сульфаты кальция и др. И наоборот, интенсивность протекания процессов растворения, выщелачивания, массопереноса тем сильнее, чем меньше валентность компонентов-загрязнителей.

Зависимость водной миграции компонентов-загрязнителей от ионных весов определяется следующим положением: чем больше ионный вес компонента, тем сильнее он связан с породой и твердыми отходами, тем хуже переходит в подземные воды и тем слабее его водная миграция; например, водная миграция двухвалентного бария с ионным весом 137,34 меньше, чем двухвалентного марганца с ионным весом 54,93.

Соотношение интенсивности миграции компонентов-загрязнителей, имеющих разные ионные веса, с характером физико-химических процессов миграции и массопереносом такое же, как и в случае компонентов-загрязнителей, имеющих различную валентность. Интенсивность процессов растворения и выщелачивания и процессов массопереноса значительно больше для компонентов с меньшими ионными весами, а сорбционных процессов и процессов выпадения из вод твердых осадков — для компонентов с большими ионными весами.

Зависимость водной миграции компонентов-загрязнителей от ионного радиуса сложная. Чем больше ионный радиус компонента, тем легче он переходит в подземную воду, характеризующуюся более рыхлой по сравнению с породами и твердыми отходами структурой, и тем сильнее его участие в процессах растворения, выщелачивания. В пределах однозначных по валентности компонентов большая способность к этим процессам отмечается у компонентов с большей величиной ионного радиуса. Так, по совокуп-

ности значений валентности и ионного радиуса (A°), по Гольдшмидту, наиболее широко распространенные макрокомпоненты образуют следующий миграционный ряд по отношению к названным процессам: $K^+ - 1,33 > Na^+ - 0,98 > Ca^{2+} - 1,06 > Mg^{2+} - 0,78$. В то же время компоненты-загрязнители с большим ионным радиусом слабее переносятся подземными водами, следовательно, менее интенсивно участвуют в процессах массопереноса. Сорбционным же процессам, а также процессам образования и выпадения из подземных вод твердых осадков более подвержены компоненты-загрязнители с меньшим ионным радиусом.

Для определения подвижности компонентов-загрязнителей в подземных водах, интенсивности их перехода из твердых отходов в подземную воду и интенсивности проявления процессов выпадения в твердом виде соединений из подземных вод пользуются величиной ионного потенциала (отношение величины валентности к величине ионного радиуса). Подвижность компонентов в подземных водах, т.е. склонность к процессам массопереноса, обратно пропорциональна величине ионного потенциала. Например, среди одноименных по валентности ионов ионный потенциал лития +1,3, рубидия +0,67, цезия +0,61; ионы располагаются по убыванию подвижности в подземной воде следующим образом: $Cs > Rb > Li$.

В системе „подземная вода — порода“ (или твердые отходы) процессы перевода в жидкую фазу более интенсивны для компонентов-загрязнителей с большим ионным потенциалом, а процессы перевода из жидкой в твердую — для компонентов-загрязнителей с меньшим ионным потенциалом.

Б.М. Мэзон выделил группы элементов по интенсивности подвижности в соответствии с величинами ионных потенциалов. В группе с ионным потенциалом до +3—Li, Rb, Cs, Sr, Ba, Mn^{2+} , Fe^{2+} , Ni, Co, Zn, Cd, Hg, Pb, Cu, Ag, Au; эти элементы слабо переходят в воду, но хорошо переносятся водой. В группе с ионным потенциалом более +3 — Fe^{3+} , Ga, Al, U, Zr, Ti, Nb, Ta, Mn^{4+} . Эти элементы легче переходят в воду, но в воде слабо подвижны.

Из микрокомпонентов-загрязнителей наиболее растворимы и легко подвижны галоидные, гидрокарбонатные и сульфатные соединения Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} ; менее растворимы и менее подвижны $SrSO_4$, $SrCO_3$, $BaCO_3$; минимально подвижны окислы Fe^{3+} , Mn^{3+} и окислы Ti^{4+} , Zn^{4+} , Th^{4+} , Sn^{4+} .

2.3.2. Природные факторы распространения загрязнений в подземных водах

Природные факторы миграции компонентов-загрязнителей представлены преимущественно климатическими, геоморфологическими и геолого-гидрогеологическими факторами.

Климатические факторы существенно влияют на миграцию компонентов-загрязнителей, так как последние характерны для грунтовых и пластовых вод зоны интенсивного водообмена. Их влияние проявляется через количество атмосферных осадков, в состав которых в ряде районов входят компоненты-загрязнители. В других районах незагрязненные атмосферные осадки способствуют разбавлению подземных вод и снижению концентрации в них компонентов-загрязнителей.

Кроме того, количество атмосферных осадков в совокупности с температурой воздуха обуславливает существование областей с гумидным, аридным климатом и многолетней мерзлотой, характеризующихся своеобразными условиями миграции компонентов-загрязнителей.

Преобладающими природными компонентами подземных вод гумидных

областей являются гидрокарбонаты, сульфаты, кальций, магний; они обеспечивают потенциальную вероятность выпадения ряда компонентов-загрязнителей из вод в виде твердых слабо растворимых соединений. Для подземных вод областей многолетней мерзлоты и аридных областей характерны компоненты хорошо растворимых веществ. Эти компоненты образуют геохимическую среду, способствующую миграции на значительные расстояния многих компонентов-загрязнителей.

Ветрами осуществляется перенос компонентов-загрязнителей, содержащихся в атмосфере, в новые районы и последующее их поступление в подземную воду с загрязненными атмосферными осадками.

Рельеф как фактор самостоятельный сказывается на разбавлении загрязненных подземных вод атмосферными осадками. В этой связи выделяются: а) регионы горно-складчатых областей, характеризующиеся, с одной стороны, резкими колебаниями в условиях разбавления, а с другой — преобладанием условий слабого разбавления подземных вод атмосферными осадками; б) платформенные районы с широко распространенными условиями разбавления подземных вод атмосферными осадками.

К геолого-гидрогеологическим факторам водной миграции компонентов-загрязнителей относятся термодинамические и гидродинамические факторы, химический состав природных подземных вод.

Влияние термодинамических факторов на миграцию компонентов-загрязнителей в подземных водах проявляется через изменение растворимости их минеральных соединений в различных условиях температуры и давления.

С изменением температурных условий растворимость различных минеральных соединений компонентов-загрязнителей изменяется неоднозначно. Выделяются три группы минеральных соединений. В первую входят карбонаты кальция (известняк) и карбонаты кальция и магния (доломит). С повышением температуры их растворимость уменьшается. При этом степень уменьшения растворимости известняка и доломита неодинакова. При увеличении температуры до 55°C растворимость первого превышает в 1,5 раза растворимость второго; при 55°C их растворимости равны; при температуре более 55°C растворимость второго выше растворимости первого (табл. 8).

Вторую группу среди компонентов-загрязнителей составляют сульфатные соединения кальция, магния и натрия. При низких диапазонах температуры растворимость названных соединений с повышением температуры увеличивается и, достигнув максимума, при дальнейшем ее повышении уменьшается. Для сульфата кальция переходной температурой является 40°C , для сульфата натрия — 50°C ; для сульфата магния — 70°C .

В третью группу входят преимущественно хлориды, а также карбонат натрия. Растворимость этих соединений с повышением температуры увеличивается в несколько раз. Экспериментальные сведения о растворимости соединений всех трех групп при разных температурах приведены в табл. 9.

Увеличение давления способствует повышению растворимости большинства минеральных соединений, так как вызывает нарушения в их структуре. Влияние давления на миграцию компонентов-загрязнителей в подземных водах второстепенное по сравнению с влиянием температуры, что объясняется незначительными величинами давления в пределах водоносных комплексов, подверженных загрязнению.

Влияние гидродинамических факторов на миграцию компонентов-загрязнителей в подземных водах проявляется через направление движения и скорость фильтрации подземных вод. Направление движения подземных вод — фактор более общий и действующий на более обширных площадях

Таблица 8

Растворимость карбонатных, сульфатных и хлоридных соединений
в дистиллированной воде (г/л) при различных температурах ($P = 1$ атм)
[по Б.П. Никольскому, 1935; В.И. Манихину, 1966]

°C	CaCO ₃	CaSO ₄	NaCl	KCl	MgCl ₂	°C	CaCO ₃	CaSO ₄	NaCl	KCl	MgCl ₂
0	0,081		263	222	346	40		2,197			
5	0,075					50		1,896			
10	0,070					60			271	313	379
15	0,065					100			280	360	425
20	0,060					200			315	450	575
25	0,056					300			375	540	675
30	0,052	2,498	265	272	354						

Таблица 9

Растворимость CaCO₃ и CaMgCO₃ в воде при различных температурах ($P_{CO} = 1$ атм)
[по О.К. Янатьевой, 1955]

°C	Содержание HCO ₃ ⁻ , мг/л		°C	Содержание HCO ₃ ⁻ , мг/л	
	CaCO ₃	CaMgCO ₃		CaCO ₃	CaMgCO ₃
0	915	660	55	360	360
25	480	390	70	200	276

по сравнению со скоростью фильтрации. В направлении движения подземных вод осуществляется перенос компонентов-загрязнителей. В пределах грунтового и пластовых водоносных комплексов зоны интенсивного водообмена движение вод имеет направление от областей преимущественной инфильтрации, приуроченных к водораздельным пространствам, к областям дренирования — долинам водотоков и котловинам водоемов. В зависимости от места положения объектов загрязнения на пути движения подземных вод загрязнением охватываются различные по размерам площади.

Распределение концентрации компонентов-загрязнителей в подземных водах в направлении их движения в пределах участков распространения источников загрязнения определяется переходом компонентов-загрязнителей в воду по уравнению $C = C_H - (C_H - C_0) \cdot e^{-\frac{\gamma}{v}x}$ или $C = C_H - (C_H - C_0)e^{-\gamma t}$, где C_H — концентрация насыщения; v — скорость фильтрации; γ — коэффициент скорости растворения.

Коэффициент скорости растворения определяется лабораторным и расчетным путем по формуле $\gamma = \frac{1}{t} \ln \frac{C_H - C_0}{C_H - C}$ или $\gamma = \frac{v}{x} \ln \frac{C_H - C_0}{C_H - C}$ [Ордовская и др., 1957].

График зависимости концентрации компонентов-загрязнителей в подземных водах с близкими скоростями фильтрации от пути фильтрации имеет вид, представленный на рис. 7, а, а график зависимости концентрации компонентов-загрязнителей в водах от времени фильтрации — на рис. 7, б.

Как следует из графиков, концентрация компонентов-загрязнителей в подземных водах с равными скоростями тем значительнее, чем больше длина пути фильтрации и чем больше время фильтрации. Увеличение кон-

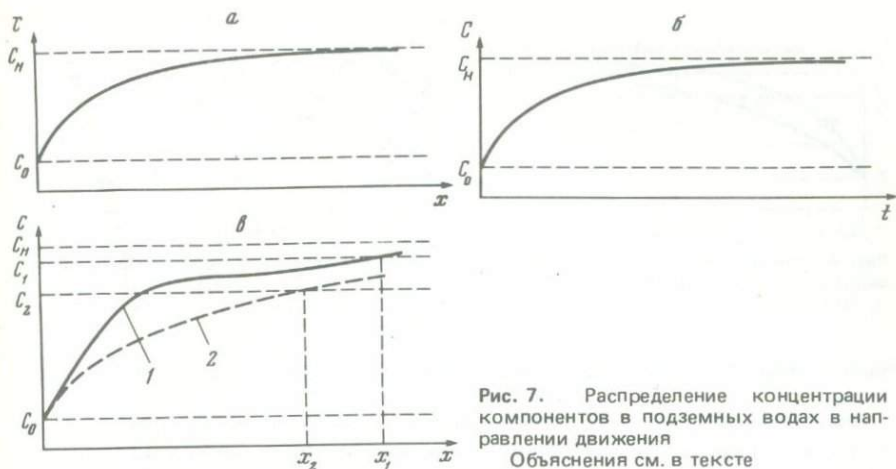


Рис. 7. Распределение концентрации компонентов в подземных водах в направлении движения
Объяснения см. в тексте

центрации компонентов-загрязнителей в этих условиях является результатом равномерного поступления в каждый объем подземной воды, в направлении ее движения, новых порций компонентов-загрязнителей от их источников.

Тогда различие в концентрации компонентов-загрязнителей в подземных водах в двух точках водоносного комплекса, расположенных по направлению движения подземных вод, формируется в условиях $v_1 = v_2$; $x_1 > x_2$; $\tau_1 > \tau_2$. Следовательно, $C_1 > C_2$ (v – скорость фильтрации; x – длина пути фильтрации; τ – время фильтрации; C – концентрация компонента-загрязнителя) (рис. 7, а).

В случаях, когда концентрация компонентов-загрязнителей в подземных водах формируется путем массопереноса и комплекса физико-химических процессов (выщелачивания, растворения, сорбции и др.) в условиях фильтрационной неоднородности, решение задачи по определению распределения концентрации компонентов в направлении движения вод значительно усложняется.

Влияние скорости движения подземных вод на изменения в концентрации компонентов-загрязнителей проявляется локально на фоне изменений, вызываемых региональными гидродинамическими условиями, выражаемыми через направление движения вод.

Различие в скоростях фильтрации подземных вод разных участков одного или ряда водоносных комплексов всегда сказывается на концентрации компонентов-загрязнителей в подземных водах. Соотношения между скоростями фильтрации и временем протекания различных процессов массообмена (выщелачивания и др.) при этом неодинаковы. Их разнообразие в общем виде укладывается в следующие две схемы: 1) $v_1 > v_2$; $x_1 = x_2$; $\tau_1 < \tau_2$ и 2) $v_1 > v_2$; $\tau_1 = \tau_2$; $x_1 > x_2$.

В первом случае $C_1 < C_2$ (рис. 8, а), во втором $C_1 > C_2$ (рис. 8, б).

В первом случае большая концентрация компонентов-загрязнителей в подземных водах на участке с меньшими скоростями фильтрации объясняется более длительным временем протекания процессов выщелачивания и растворения отходов загрязнения в пределах близких по размеру площадей. Во втором случае при условии близкого времени выщелачивания и растворения отходов подземные воды с большими скоростями фильтрации взаимодействуют с более значительными объемами отходов, что способст-

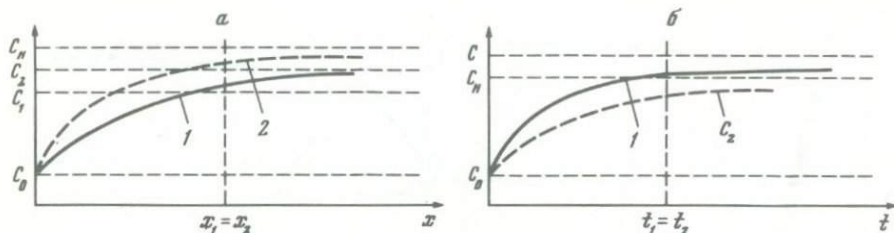


Рис. 8. Распределение концентрации компонентов в подземных водах с различными скоростями фильтрации
Объяснения см. в тексте

вует увеличению концентрации компонентов-загрязнителей в подземных водах.

Распределение концентрации компонентов-загрязнителей в подземных водах за пределами размещения их источников определяется или процессами массопереноса, или же в комплексе с массопереносом сорбционными процессами и процессами выпадения из вод компонентов-загрязнителей в твердом виде.

На участках с большими скоростями фильтрации подземных вод процессы массопереноса более интенсивны.

Формирование концентрации компонентов-загрязнителей при участии сорбционных процессов и процессов выпадения их из вод в твердом виде определяется убыванием компонентов из подземных вод согласно уравнению (1), где γ — коэффициент скорости протекания названных процессов.

В случае близких скоростей фильтрации подземных вод зависимости концентрации компонентов-загрязнителей от пути и времени фильтрации обратны зависимостям, показанным на рис. 7. Концентрация компонентов-загрязнителей в водах тем меньше, чем больше длина пути фильтрации и время фильтрации, т.е. чем длительнее протекают рассматриваемые процессы ($v_1 = v_2$; $x_1 > x_2$; $\tau_1 > \tau_2$; $C_1 < C_2$). В случае различных скоростей фильтрации зависимости концентрации компонентов-загрязнителей в подземных водах от времени фильтрации и длины пути фильтрации выражаются следующим образом: 1) $v_1 > v_2$; $x_1 = x_2$; $\tau_1 < \tau_2$; $C_1 > C_2$; 2) $v_1 > v_2$; $\tau_1 = \tau_2$; $x_1 > x_2$; $C_1 < C_2$. В пределах близких по размерам площадей в подземных водах с меньшими скоростями фильтрации сорбционные процессы и процессы выпадения компонентов-загрязнителей в твердом виде протекают в течение большего времени и способствуют более существенному убыванию компонентов-загрязнителей из вод. При условии близкого времени протекания сорбционных процессов воды с большими скоростями фильтрации взаимодействуют с большими объемами сорбирующей породы, что приводит к более интенсивному снижению концентрации компонентов-загрязнителей в этих водах.

Химический состав природных подземных вод оказывает существенное влияние на миграцию компонентов-загрязнителей. В водах различного химического состава изменяется растворимость многих минеральных соединений макро- и микрокомпонентов-загрязнителей, происходит преобразование миграционных форм компонентов-загрязнителей.

Широкое распространение в подземных водах микрокомпонентов естественного формирования свидетельствует о возможности обширной водной миграции микрокомпонентов-загрязнителей.

Микрокомпоненты содержатся в различных концентрациях в водах

Таблица 10

Наиболее часто встречающийся диапазон содержания Mn, Cu, Fe, Al, Ba в подземных водах различного химического состава, мг/л

Подземные воды	Mn	Cu	Fe	Al	Ba
Σ_M до 1 г/л смешанные	До первых единиц				
Σ_M до 25 г/л HCO ₃ ClNa	0,2–5,0	0,2–8,0	0,2–2,0	1,5–35,0	0,5–50,0
Σ_M до 150 г/л ClNa	3,7–20	5,2–10,7	2,0–15,0	15,0–25,0	9,0–12,0
Σ_M 25–250 г/л ClNaCa	4,5–18	5,0–97,0	3,4–40,0	11,9–32,0	2,4–11,6
Σ_M 70–300 г/л ClNaCa	2,3–28	0,2–29,0	3,4–214,6	13,5–32,0	8,1–200,0
Σ_M 300 г/л ClCaNa	0,5-5,0	0,8–18,0	0,5–6,2	1,0–2,9	Сл. –7,0

с разной суммарной минерализацией и ионным составом (табл. 10). Высокие концентрации микрокомпонентов приурочены к относительно мало минерализованным водам HCO₃ ClNa состава (воды этого состава способствуют переходу в них микрокомпонентов), наиболее высокие — к водам ClNa и ClNaCa состава (воды этого состава способствуют накоплению в них микрокомпонентов).

По аналогии с микрокомпонентами естественного формирования можно сделать вывод о наиболее вероятной миграции микрокомпонентов-загрязнителей на значительные расстояния в глубоких водоносных комплексах с подземными водами хлоридного натриево-кальциевого состава и об относительно благоприятных условиях их сохранения в подземных водах гидрокарбонатно-хлоридного натриевого состава.

Из приведенных в табл. 11 сведений о растворимости соединений некоторых микрокомпонентов-загрязнителей последние по растворимости подчиняются следующим закономерностям.

Резко повышена растворимость соединений свинца и меди, цинка и марганца с мышьяком. Для многих микрокомпонентов, особенно для меди, цинка, никеля, марганца, наименее растворимыми являются соединения с карбонат-ионом, наиболее растворимыми — с хлор-ионом; промежуточное положение по растворимости занимают соединения с сульфат-ионом.

Влияние состава подземных вод на растворимость соединений, представленных макрокомпонентами-загрязнителями, видно на примере сульфата кальция. В подземную воду с различной концентрацией хлористого натрия поступают разные количества загрязнений этого вида. Максимальные его количества составляют около 7 г/л при концентрации хлористого натрия в подземной воде около 130–140 г/л. В воде хлоридного магниевого состава растворимость сульфата кальция увеличивается до 8,7 г/л, т.е. растворимость макрокомпонентов-загрязнителей увеличивается в подземных водах с повышенной ионной силой (μ) при наличии компонентов, равноионных с компонентами-загрязнителями. Такие подземные водные растворы являются катализаторами, способствующими переходу компонентов-загрязнителей в подземную воду.

Учет миграционных форм компонентов-загрязнителей позволяет точнее оценить растворимость соединений этих компонентов, граничные условия выпадения компонентов из подземных вод и в целом закономерности

Таблица 11

Растворимость соединений наиболее распространенных микрокомпонентов-загрязнителей при $t = 25^\circ \text{C}$ и $P = 1 \text{ атм.}$ [составлена по материалам Ф.И. Тютюновой, 1978]

Компонент	Соединение	р.П.А.	Компонент	Соединение	р.П.А.
S	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	4,43	Cu, As	$\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$	35,12
P	Ca HPO_4	6,57	Zn	ZnCO_3	10,78
F	MgF_2	8,17		Zn(OH)_2	17,15
	CaF_2	10,40		$\text{ZnCl}_{(2-n)}(\text{OH})_n$	12,60–17,95
				$\text{Zn(SO}_4)_{(1-0,5n)}(\text{OH})_n$	14,44–19,71
Pb	PbCl_2	4,79	Zn, As	$\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2$	26,97
	PbSO_4	7,80	Ni	NiCO_3	7,75
	PbCO_3	13,13		$\text{Ni(SO}_4)_{(1-0,5n)}(\text{OH})_n$	6,89–14,85
	$\text{Pb(SO}_4)_{(1-0,5n)}(\text{OH})_n$	15,80–16,82		$\text{Ni(NO}_3)_{(2-n)}(\text{OH})_n$	9,60–16,25
	Pb(OH)_2	19,96		$\text{Ni(Cl)}_{(2-n)}(\text{OH})_n$	10,42–16,49
	$\text{PbCl}_{(2-n)}(\text{OH})_n$	14,00–20,04		Ni(OH)_2	16,19
Pb, F	PbClF	8,55			
Pb, P	Pb HPO_4	9,90	Ni, As	$\text{Ni(AsO}_4)_2$	25,51
Pb, As	$\text{Pb(AsO}_4)_2$	35,39	Mn	MnCO_3	9,30
Cu	CuCO_3	9,63	Mn, As	$\text{Mn(AsO}_4)_3$	28,72
	Cu(OH)_2	18,80			
	$\text{Cu(SO}_4)_{(1-0,5n)}(\text{OH})_n$	11,39–19,26			
	$\text{Cu(NO}_3)_{(2-n)}(\text{OH})_n$	13,85–19,89			
	$\text{CuCl}_{(2-n)}(\text{OH})_n$	14–0,4–19,94			

их миграции в сложных системах, образуемых компонентами-загрязнителями с подземными водами, породами и другими природными средами. Для большинства компонентов-загрязнителей формы миграции сложные, характеризующиеся разнообразной степенью устойчивости в разных типах подземных вод и с разной степенью активности принимающие участие в различных физико-химических процессах.

В целом комплексные ионы играют значительную роль в загрязнении подземных вод. Целый ряд комплексных ионов, например $[\text{Sn(OH)}]$ и другие, хорошо мигрируют в подземных водах и способствуют их загрязнению.

Многие комплексы хорошо растворимы в воде, например $[\text{BeF(H}_2\text{O)}_3]^-$, $[\text{BeF(OH)}_3]^{2-}$, $[\text{AlF(H}_2\text{O)}_5]^{2+}$, $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})]^{2-}$, $[\text{Th(CO}_3)_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})]^{2-}$ и др. Различные комплексы, образованные тем или иным элементом, имеют разные размеры, валентность и другие геохимические свойства, что определяет разнообразную их миграционную способность.

Проведенный нами анализ данных Ф.И. Тютюновой [1978] показывает, что миграционными формами макрокатионов в загрязненных подземных водах являются: а) натрия: Na^+ — от 96,60 до 99,95% от суммарного содержания компонента; NaSO_4^- — от 0,04 до 2,74%, NaHCO_3^0 — от 0,01 до 0,48; б) магния: Mg^{2+} — от 52,54 до 94,60%, MgSO_4^- — от 4,32 до 47,08%, MgHCO_3^+ — от 0,35 до 2,63%; в) кальция: Ca^{2+} — от 39,59 до 94,90%, CaSO_4^- — от 2,10 до 43,18%, CaHCO_3^+ — от 0,47 до 3,50%, CaNO_3^+ — от 0,03 до 0,45%.

Таким образом, большая часть натрия, магния и кальция в загрязненных подземных водах представлена в катионно-ионной элементарной форме (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}). Комплексы натрия, магния и кальция с сульфатом в незначительной степени преобладают над комплексами с гидрокарбонатом.

На примере меди и цинка видно, что для микрокомпонентов, как и для макрокомпонентов, преобладающими формами миграции в загрязненных подземных водах являются катионы-металлы. Так, миграционные формы меди представлены в загрязненных подземных водах в количествах от 3,96 до 97,59% от суммарного его содержания ионом Cu^{2+} , в количествах от 2,40 до 83,70% — органическими комплексами, в количествах от 0,02 до 5,06% — CuOH^+ и в количествах от 0,03 до 0,19% — CuCl^+ .

Миграционные формы цинка (в %): Zn^{2+} — от 2,11 до 88,59, органические комплексы — от 1,63 до 78,90, ZnOH^+ — от 1,98 до 23,70, ZnSO_4^0 — от 0,41 до 41,94.

Соотношение между количеством простейших катионов и их органическими соединениями в загрязненных подземных водах различного макрокомпонентного состава неодинаково. Так, в подземных водах гидрокарбонатного типа для цинка, меди, свинца характерно преобладание органических форм миграции над неорганической катионной формой; в подземных водах сульфатного типа наблюдается незначительное преобладание неорганической катионной формы над органической, иногда их содержания близки; в подземных водах хлоридного типа цинк и свинец мигрируют преимущественно в форме органических соединений, а медь — в неорганической катионной форме.

Выявленная близость между миграционными формами компонентов-загрязнителей и компонентов естественного формирования позволяет на основании изучения распространения в подземных водах ряда микроэлементов ориентироваться в формах миграции аналогичных микрокомпонентов-загрязнителей.

Йод наиболее распространен в подземных водах в йодидной (I^-) и йодатной (JO_3^-) формах, а также в форме свободного йода J_2 и различных комплексных неорганических и органических соединений. Йодид-ион характерен для восстановительных, а йодат-ион — для окислительных условий. Поскольку загрязнению подвергаются чаще всего подземные воды, характеризующиеся окислительными условиями, то основной миграционной формой для йода-загрязнителя является йодатная форма. Йодат-ион в подземных загрязненных водах образует положительно заряженные комплексные ионы с кальцием, магнием, калием, стронцием, барием и др.

Бром в подземных водах мигрирует преимущественно в форме бромид-иона Br^- , но имеют место также свободный бром Br_2 и броматный ион BrO_3^- . Бромидные и броматные ионы образуют множество неорганических и органических комплексов. Бромидный ион образует комплексы со многими металлами (медью, железом, цинком и др.). Свободный бром наиболее миграционен в кислой среде, бромат-ион — в резко щелочной,

бромид-ион и его комплексы — в нейтральной и близких к нейтральной средах. Следовательно, формы миграции брома в каждом конкретном случае будут зависеть от величины pH подземных вод.

Фтор в подземных водах может быть представлен простым анионом F, фторкомплексами алюминия, железа, олова и других металлов, в виде комплексов с водородом HF⁰, с кремнием SiF₆²⁻ и др. Комплексообразование и формы водной миграции фтора в значительной степени определяются щелочно-кислотными условиями. По С.Р. Крайнову [Крайнов, Швец, 1980], в интервале pH 4–5 наиболее вероятными формами миграции фтора в подземных водах являются HF (H₂F₂), SiF₆²⁻, AlF_{3-n}⁻ⁿ, BF_{3-n}⁻ⁿ, в интервале pH 5–9 — AlF_nⁿ⁻ и BF_n(OH)_nⁿ⁻ при pH > 9 — F⁻. По данным С.А. Брусилковского, возможны комплексы фтора с магнием, барием, свинцом, марганцем и другими металлами. При комплексообразовании с металлами благоприятна высокая концентрация фтора в водах.

Стронций мигрирует в водах в форме простых катионов Sr²⁺ и в форме комплексов SrSO₄⁰, SrOH⁺, SrNO₃⁺ и др. Наиболее существенными в водно-миграционном отношении являются сульфатные комплексы стронция. Наиболее распространены они в подземных водах хлоридного типа, менее — в водах сульфатного типа. В водах же гидрокарбонатного типа сульфатные комплексы стронция практически отсутствуют; в этих водах основной формой нахождения стронция является форма катиона стронция Sr²⁺.

Барий в водных растворах может присутствовать в форме катиона бария Ba²⁺ и в форме различных комплексов, например BaSO₄⁰, BaOH⁺, BaNO₃⁺ и др. Большая часть бария в водах мигрирует в форме комплексов. Наиболее миграционны сульфатные комплексы бария. Повышенные миграционные свойства сульфатных комплексов бария обеспечивают высокие концентрации этого микроэлемента в сильноминерализованных водах сульфатного и хлоридного типов.

Для меди характерно большое разнообразие миграционных форм. Помимо простых катионов Cu²⁺, медь может образовывать сульфатные, хлоридные, гидрокарбонатные, а также гидроксокомплексы. Чаще всего медь в водах находится в форме следующих комплексов: CuOH⁺, Cu(OH)₂⁰, CuSO₄⁰, CuCl⁺, CuCl₂⁰, CuCO₃⁰, Cu(CO₃)₂²⁻, CuBr⁺, Cu(OH)₂⁰. Миграция меди в тех или иных формах зависит от химического состава подземных вод и от величины pH. В гидрокарбонатных водах с pH около 6–7 медь мигрирует преимущественно в форме катиона Cu²⁺ и в значительном количестве в форме комплексов CuOH и CuSO₄⁰. В более щелочных гидрокарбонатных водах (pH до 7,2–7,5) больше содержится меди в форме карбонатных комплексов CuCO₃ и Cu(CO₃)₂²⁻, а также в форме гидроксокомплексов. В щелочных водах гидрокарбонатного типа главными формами миграции являются гидрокарбонатные комплексы меди. В водах сульфатного и хлоридного типов с pH > 6,5–7,0 медь присутствует практически полностью в форме простых катионов и сульфатных комплексов; с pH 7,0–7,5 увеличивается содержание гидроксокомплексов и карбонатных комплексов; с pH 7,5 преобладают карбонатные комплексы. В водах хлоридного типа с нейтральной средой медь мигрирует главным образом в форме хлоридных, а также сульфатных комплексов.

Свинец может мигрировать в водах в форме двухвалентного катиона Pb²⁺ и в форме разнообразных комплексов PbOH⁺, Pb(OH)₂⁰, PbNO₃⁺, PbCl⁺, PbCl₂⁰, PbCl₃⁻, PbCl₄²⁻, PbCO₃⁰, PbSO₄⁰, PbBr⁺, PbBr₂⁰, PbBr₄²⁻, PbJ³⁺, PbJ⁻, PbJ₂²⁻. Нахождение свинца в водах в тех или иных миграционных формах определяется геохимическим типом вод и щелочно-кислотными

их условиями. В кислой и нейтральной средах преобладают формы простых катионов меди. В щелочных условиях (при pH более 8,5) значительная часть свинца находится в форме гидроксокомплексов и карбонатных комплексов. В водах сульфатного и хлоридного типов с величинами pH, близкими к нейтральным, главной формой миграции свинца являются сульфатные комплексы.

Марганец в подземных водах верхней части земной коры, характеризующихся окислительной обстановкой, находится в двухвалентной форме. Меньшая часть марганца представлена комплексами $MnOH^+$, $MnSO_4^0$ и др. Соотношение в содержании различных форм марганца в водах зависит от величин pH и геохимических типов вод. В водах гидрокарбонатного типа при pH 6,5–7,5 марганец находится в виде двухвалентных катионов и в виде сульфатных комплексов; при pH более 8,5 присутствуют сульфатные комплексы и гидроксокомплексы марганца. В водах сульфатного и хлоридного типов увеличивается миграционная роль сульфатных комплексов при сохранении главной миграционной роли двухвалентного марганца.

На примере меди, свинца и марганца можно представить основные особенности распределения миграционных форм микроэлементов в водной среде в зависимости от геохимического типа воды и величины pH водной среды. Общей особенностью для меди, свинца, марганца является миграция в подземных водах различных геохимических типов в форме простых ионов. Наибольшее число простых ионов распространено в водах с величинами pH до 8,5; при величинах pH более 8,5 миграционная форма микрокомпонентов, представленная простыми ионами, составляет, как правило, небольшой процент.

Форма простых ионов наиболее характерна для вод гидрокарбонатного типа. Процент простых ионов убывает от вод гидрокарбонатных через сульфатные к водам хлоридным.

2.3.3. Процессы распространения загрязнений в подземных водах

Микроорганизмы обладают коротким периодом жизни (десятки суток, максимально до 1000 суток), что в основном определяет их миграционные особенности. Последние заключаются в относительно малых длинах путей миграции. С этим связана вторая миграционная особенность микроорганизмов: загрязненные ими подземные воды не имеют регионального распространения; как правило, они занимают локальные участки. Третья особенность миграции микроорганизмов-загрязнителей в подземных водах заключается в приуроченности конкретных видов микрофлоры к конкретным геохимическим обстановкам. Выделяются два вида микроорганизмов, приспособленных к обитанию в своеобразных геохимических обстановках: а) аэробные; б) анаэробные. Первые существуют в окислительных условиях. В гидрогеологическом отношении это грунтовые, а также напорные водоносные комплексы верхней части земной коры в пределах зоны интенсивного водообмена, залегающие на глубинах от нескольких десятков до первых сотен метров. Вторые распространены в восстановительных условиях, в среднем на глубинах от 300 до 400 м. Помимо восстановительных условий, фактором, обеспечивающим жизнедеятельность анаэробных микроорганизмов, является температура. При очень высоких (превышающих 80–100°С) температурах эти микроорганизмы прекращают свое существование. Поэтому подземные воды, в которых могут находиться анаэробные микроорганизмы-загрязнители, имеют ограниченные (до нескольких сотен метров – 1000 м) глубины залегания. Нижний предел температурных условий, позволяющих миг-

рировать в подземных водах микроорганизмам, около 0°С, хотя известны случаи существования в подземных водах микроорганизмов при отрицательных температурах (водоносные комплексы Якутского артезианского бассейна и др.). В целом температурный фактор не лимитирует миграцию микроорганизмов-загрязнителей в подземных водах верхней части земной коры во все времена года.

При изучении распространения микроорганизмов-загрязнителей в подземных водах необходимы сведения о закономерностях размещения окислительно-восстановительных условий в верхней части земной коры. При этом исследуются факторы, способствующие формированию тех или других условий. Среди такого рода факторов в качестве главных следует назвать фильтрационные свойства пород зоны аэрации и водоносных комплексов, наличие болот. Повышенные фильтрационные свойства водосодержащих пород и пород зоны аэрации часто способствуют развитию окислительных условий за счет поступления из почв биогенного углекислого газа; болота со значительным количеством органических кислот также во многих случаях способствуют формированию окислительной обстановки.

Щелочно-кислотные условия в целом не ограничивают миграцию микроорганизмов-загрязнителей; это значит, что практически во всех подземных водах с самыми разнообразными величинами рН может происходить миграция микроорганизмов-загрязнителей. Однако характер и степень миграции микроорганизмов-загрязнителей в средах с различными величинами рН не всегда одинаковы. Выделяются группы микроорганизмов, одни из которых хорошо мигрируют в щелочных средах (нитрификаторы), другие — в нейтральных (денитрификаторы).

Жизнедеятельность микроорганизмов-загрязнителей в подземных водах зависит в значительной степени от того, относятся ли они к гетеротрофным или к автотрофным. Автотрофные микроорганизмы могут мигрировать в подземных водах, практически лишенных органических веществ. Эти микроорганизмы употребляют неорганические углерод и азот, синтезируют необходимые для них белки, углеводы, жиры и пр. Гетеротрофные микроорганизмы нуждаются для сохранения их в подземных водах в органических веществах и в связи с этим они менее миграционны по сравнению с автотрофными микроорганизмами. Это бактерии брожения, гниения и др.

На миграцию микроорганизмов-загрязнителей в подземных водах оказывает влияние химический состав подземной воды. Повышенная и высокая суммарная минерализация подземных вод неблагоприятно сказывается на миграции микроорганизмов-загрязнителей. Чем выше суммарная минерализация подземных вод, тем менее интенсивна миграция микроорганизмов-загрязнителей. Однако слабая миграция их может происходить и при высокой суммарной минерализации вод. Максимальная величина суммарной минерализации подземных вод, при которой возможна миграция микроорганизмов-загрязнителей, около 300 г/л.

Ионный состав подземных вод влияет на миграцию микроорганизмов-загрязнителей следующим образом: чем больше миграционная способность микроорганизмов-загрязнителей в подземных водах, тем больше в них концентрация наиболее миграционных макрокомпонентов. В связи с миграционной способностью макрокомпонентов наиболее благоприятной средой для миграции микроорганизмов-загрязнителей являются подземные воды натриевого или калиевого состава, менее благоприятной — магниевого и кальциевого состава, минимально благоприятной — подземные воды с большими концентрациями высококовалентных (трех и более) компонентов.

Наличие органических загрязнителей в подземных водах может резко

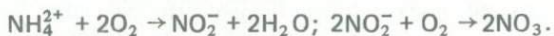
изменять их свойства. Так, некоторые органические вещества, образуя полимеры, например хелаты, сильно влияют на свойства других компонентов подземных вод.

Ионный состав и суммарная минерализация подземных вод значительно отражаются на водной миграции органических загрязнителей. Так, органические загрязнители хуже мигрируют в высокоминерализованных подземных водах; присутствие в подземных водах в повышенных концентрациях кальция и магния, по данным В.М. Швеца, препятствует миграции многих органических веществ вследствие образования слаборастворимых кальциевых и магниевых солей органических кислот. Поэтому в относительно высокоминерализованных сульфатных кальциевых, хлоридных натриево-кальциевых и магниевых подземных водах многие органические загрязнители не мигрируют или мигрируют на очень короткие расстояния.

Большое значение для миграции органических загрязнителей имеют повышенные концентрации микроэлементов. С одними из них органические загрязнители образуют слаборастворимые соединения, что ограничивает миграцию органических веществ в подземных водах.

С другими микроэлементами органические вещества образуют хорошо растворимые соединения, что способствует их переносу подземными водами на значительные расстояния. Большие длины путей миграции в подземных водах характерны для многих органических кислот, таких, как гуминовая, фульвокислота, щавелевая, лимонная, сахарная, винная, яблочная, глюконовая и другие, которые образуют поливалентными металлами (Al, Fe, Cu, Pb, Zn и пр.) хорошо растворимые органо-минеральные комплексные соединения.

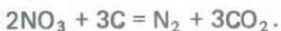
Органические вещества-загрязнители характеризуются сложными путями миграции в подземных водах. На их миграцию в подземных водах, помимо минерализации и макрокомпонентного состава, влияет большое число других природных факторов. Под влиянием некоторых факторов отдельные органические вещества удаляются из подземных вод в виде газообразных и твердых соединений; многие переходят из одних соединений в другие и продолжают мигрировать в подземных водах в ином виде. Так, например, при поступлении в подземную воду из очага загрязнения аммиака в случае окислительных условий аммиак разлагается с образованием нитритов и нитратов:



В восстановительных условиях нитриты и нитраты разлагаются с выделением свободного азота:



В присутствии органического углерода нитраты и нитриты восстанавливаются до свободного азота и углекислого газа:



Таким образом, многие конкретные формы органических веществ-загрязнителей обладают короткими путями миграции в подземных водах.

Проблема загрязнения подземных вод нитратами — особенно острая проблема, которая возникла в связи с широким распространением этого вида загрязнения и большой его опасностью. Существует стандарт на содержание нитратов в подземных водах, установленный Всемирной организацией здравоохранения для Европы (50—100 мг/л) исходя из концентрации нитратов в дренажных водах на сельскохозяйственных полях. В то же время некоторые ученые считают, что предельное содержание нит-

ратов в подземных водах должно составлять 10 мг/л. Эта величина характерна для вод водотоков и водоемов; снижение концентрации в водах водоемов и водотоков происходит в результате процессов нитрификации и др.

Фактические данные о загрязнении подземных вод нитратами многочисленны. Сведения такого рода имеются по различным странам мира. Так, в Англии в настоящее время насчитывается более 100 водозаборов, в водах которых содержание нитратов превышает норму. Водозаборы приурочены в основном к верхнемеловым известнякам и триасовым песчаникам. Продвижение фронта нитратного загрязнения происходит со средней скоростью около 1 м/год. Концентрации азота до 60 мг/л установлены в местах отсутствия покровных делювиальных суглинков, менее 4 мг/л — в местах развития делювиального и почвенно-растительного покрова.

В штате Техас (США) концентрация NO_3 в водах на глубине до 100 м изменяется от 45 до 170 мг/л. Ореол загрязнения подземных вод совпадает с распространением легких песчаных почв.

В районе Жуани-Туси (Франция), по данным режимных наблюдений, за период 1955—1975 гг. в водах 56 скважин отмечено возрастание содержания нитратов в 6 раз (до 30—40 мг/л). В поверхностных водах в отдельные периоды содержание нитратов достигало 48 мг/л и т.д.

Основным источником загрязнения подземных вод нитратами являются минеральные и органические удобрения. Интенсивность нитратного загрязнения подземных вод зависит от количества азота, выносимого из удобрений в виде нитратов ниже корнеобитаемой зоны, и от устойчивости нитратов в зоне аэрации и в водоносном пласте. На вынос нитратов в воды влияют количество и сезонное распределение атмосферных осадков, а также интенсивность орошения, характер почвогрунтов и растительного покрова. В зоне аэрации и в водоносном пласте нитраты, как правило, устойчивы. Загрязнение подземных вод минимально, если водоносный горизонт защищен толщей глин; возможность загрязнения значительно увеличивается там, где зона аэрации обладает высокой проницаемостью. В закарстованных карбонатных породах зоны аэрации в водоносных комплексах создаются неблагоприятные условия для процессов денитрификации и возможно формирование высоких концентраций нитратов в подземных водах.

Наиболее важными с позиций охраны среды процессами миграции микроорганизмов и органических загрязнителей являются те, которые способствуют их удалению из подземных вод. К ним относятся процессы разложения сложных органических веществ на простые с последующим частичным или полным их удалением из подземных вод. Этим процессам подвержены органические вещества бытовых отходов и некоторых отраслей промышленного производства. Так, например, нитраты и нитриты в восстановительной обстановке при участии бактерий-денитрификаторов разлагаются до свободного азота, а в присутствии органики — до азота и углекислого газа, которые удаляются из загрязненных подземных вод. Это оказывается возможным и потому, что загрязнению подвержены грунтовые или неглубокие напорные воды с термодинамическими условиями, близкими к атмосферным; образующиеся азот и углекислый газ в подавляющем большинстве случаев неравновесны с содержанием их в атмосфере и улетучиваются из загрязненных нитратами и нитритами подземных вод.

Разрушение органических веществ в восстановительных условиях при наличии в загрязненных подземных водах сульфатов и сульфатредуцирующих бактерий приводит к образованию карбонат- и гидрокарбонат-ионов

(например, $\text{SO}_4 + 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{HCO}_3$), которые уже при незначительной суммарной минерализации загрязненных подземных вод (0,5—0,6 г/л) и при наличии в них достаточных концентраций кальция и магния выпадают из них в виде карбонатов кальция и магния.

В случае, если загрязнения представлены взвесями, последние осаждаются из подземных загрязненных вод под действием собственной тяжести.

Многие микроэлементы-загрязнители могут поступать в подземные воды во взвешенном и агрегатном состоянии. В таком виде они переносятся подземными водами и по мере перемещения оседают или отфильтровываются в порах пород, размер которых меньше диаметра агрегата или взвешенной частицы.

Распространение минеральных загрязнений в подземных водах является результатом большого числа разнообразных процессов. Большинство из них развивается во взаимосвязи в различных природных обстановках. Общей характерной особенностью последних является преобладание окислительных условий. Число и характер процессов, обеспечивающих ту или иную картину положения загрязнений в пространстве и во времени, конкретизируются в связи со следующим: 1) с приуроченностью подземных вод к участкам, занятым источниками загрязнения, или с их размещением вне этих участков; 2) с фазовым состоянием и химическим составом загрязнений; 3) с минерализацией и ионным составом подземных вод; 4) с литолого-геохимическими свойствами пород.

Каждому из перечисленных условий соответствуют характерные процессы распространения загрязнений. В то же время перечисленные условия в подавляющем большинстве случаев проявляются в том или ином сочетании, что определяет тот или иной конкретный комплекс процессов. Однако часто в пределах комплекса процессов можно выделить преобладающие и второстепенные.

В самом общем виде множество процессов распространения загрязнений в подземных водах систематизируются в три группы: а) массопереноса; б) массообмена; в) смешения.

В пределах участков, занятых источниками загрязнения, одновременно проявляются все три типа процессов; на участках, где источники загрязнения отсутствуют, преобладают процессы массопереноса и массообмена. Характер процессов массообмена в первом и втором случаях, как правило, различен. В первом случае преобладают процессы перевода компонентов-загрязнителей в подземную воду, во втором — или вывода их из подземных вод, или же более сложные процессы.

В зависимости от фазового состояния загрязнителей процессы перевода компонентов-загрязнителей в подземную воду в пределах первых участков представлены растворением и выщелачиванием (в случае твердых загрязнителей), смешением (в случае жидких загрязнителей), теми и другими процессами (в случае наличия одновременно твердых и жидких загрязнителей).

Состав твердых загрязнителей обуславливает различный характер процессов выщелачивания. Возможны следующие виды выщелачивания: углекислотное, окисление, сернокислотное. Состав подземных вод также влияет на характер процессов выщелачивания; слабоминерализованные подземные воды обеспечивают выщелачивание некоторых твердых загрязнителей по типу выщелачивания растворами с повышенной ионной силой.

Процесс смешения жидких загрязнителей с подземными водами может сопровождаться процессом образования и выпадения из смесей в твердом виде слаборастворимых соединений. Возникновение этого процесса и состав образующихся твердых осадков определяются составом жидких загрязнителей и подземных вод.

На участках, где источники загрязнения отсутствуют, соотношение между процессами массопереноса и массообмена, а также конкретный характер процессов массообмена обуславливаются литолого-геохимическими особенностями пород и составом загрязненных подземных вод. Можно в самом общем виде выделить три обстановки с характерными процессами. Первая обстановка — преимущественно песчаные силикатные породы; загрязненные подземные воды независимо от состава практически не взаимодействуют с этими породами; преобладают процессы массопереноса. Вторая обстановка — изверженные, метаморфические, осадочные терригенные алюмосиликатные, карбонатные, сульфатные породы; протекают процессы массопереноса, сопровождаемые выщелачиванием и растворением пород. Виды выщелачивания зависят от минералогического состава пород. Выщелачивание и растворение при их длительном протекании в ряде случаев могут привести к пересыщению загрязненных подземных вод и возникновению процессов выпадения из вод твердых соединений. Третья обстановка — преимущественно глинистые породы; преобладают сорбционные процессы.

Роль процессов массопереноса в распространении загрязнений в подземных водах, несмотря на неравномерность их проявления по площади и в связи с особенностями природных условий различных регионов, значительна. Процессы массопереноса способствуют выносу загрязнений за пределы участков размещения источников загрязнения и интенсивности протекания процессов массообмена. Процессы массопереноса в самостоятельном выражении могут осуществляться только в условиях силикатных, песчаных пород на участках размещения жидких загрязнений, а в случае твердых загрязнений — за их пределами. В остальных случаях процессы массопереноса протекают в сочетании с процессами массообмена.

Распространение компонентов-загрязнителей или веществ-загрязнителей в подземных водах осуществляется процессами конвективного и конвективно-диффузионного переносов, а также процессами молекулярной диффузии.

Скорости процессов конвективного переноса загрязнений в подземных водах полностью определяются скоростями движения подземных вод.

Конвективный перенос свойствен подземным водам, обладающим наибольшими скоростями фильтрации. В этих условиях водовмещающие породы представлены крупнозернистыми песчаными разностями и сильноотрециноватыми песчаниками. Если загрязнение подземных вод происходит в этих условиях за счет жидких отходов, процессы конвективного переноса обуславливают быстрое распространение загрязненных вод на значительные расстояния. В случае твердых загрязнений последние поступают в воду в незначительных концентрациях, что обуславливается малым временем взаимодействия с ними каждого объема подземной воды.

При протекании конвективного переноса загрязненных подземных вод одновременно с процессами массообмена между водами и породами на участках, расположенных за пределами очагов загрязнения, подземные воды приурочены к сложным в минералогическом отношении сильноотрециноватым терригенным, изверженным, метаморфическим, карбонатным, сульфатным породам, а также к конгломерато-галечниковым отложениям. Процессы массообмена в этих условиях чрезвычайно слабы, что определяется большими скоростями фильтрации загрязненных подземных вод и, следовательно, малым временем их взаимодействия с породами. Это в равной мере относится как к процессам выщелачивания и растворения, так и к сорбционным процессам. Однако в случае сорбционных процессов их

слабое протекание в рассматриваемой ситуации способствует сохранению на значительных площадях загрязненных подземных вод.

Конвективный перенос может сопровождаться процессом образования и выпадения в твердом виде из загрязненных подземных вод слаборастворимых соединений. Этот процесс возникает в системе "подземная вода — жидкие загрязнители". Он не зависит от скорости фильтрации подземных вод и может приводить в условиях конвективного переноса к значительному снижению в подземных водах концентрации компонентов-загрязнителей.

Процесс конвективно-диффузионного переноса также зависит от скорости движения подземных вод. Он описывается уравнением $\partial C/\partial t = D \Delta C - \bar{v} \text{grad}(C)$ [Шестаков, 1961; и др.]. Конвективно-диффузионный перенос загрязнений в природных условиях осуществляется в обстановке относительно повышенных скоростей фильтрации и характерен для несильнотрещиноватых терригенных, карбонатных и сульфатных отложений и среднезернистых песчаных разностей. При конвективно-диффузионном переносе компонентов-загрязнителей существуют несколько большие, чем при конвективном переносе, возможности протекания сопутствующих процессов массообмена, приводящих к уменьшению концентрации компонентов-загрязнителей. При изменении окислительно-восстановительных, щелочно-кислотных условий возможно выпадение компонентов-загрязнителей из подземных вод в твердом виде. Основные положения проявления и последствий конвективно-диффузионного переноса загрязненных подземных вод те же, что и в случае конвективного переноса.

Молекулярно-диффузионные процессы переноса компонентов-загрязнителей — это процессы, заключающиеся в перемещении компонентов вследствие стремления их концентрации к равновесному распределению в пространстве. Они протекают под влиянием концентрационного градиента (dC/dh) в направлении меньших величин концентрации. Эти процессы развиваются в подземных водах с очень малыми скоростями фильтрации, заключенных в глинистых отложениях. По первому закону Фика количество диффундирующего за время dt вещества равно $dQ = DS \frac{dC}{dh} dt$ (S — площадь поверхности, через которую диффундирует вещество; D — коэффициент диффузии — количество вещества, диффундирующего в единицу времени через единицу поверхности при градиенте концентрации, равном единице), $\text{см}^2/\text{с}$ или $\text{см}^2/\text{сут}$.

По второму закону Фика изменение концентрации вещества за время $dt \frac{dC}{dh} = D \frac{d^2 S}{dh^2}$. В целом поток молекулярной диффузии для водоносных комплексов с возможным загрязнением подземных вод выражается как $J_d = D_C \text{grad } C$.

В свободном подземном водном растворе, заключенном в песчаных отложениях, коэффициент молекулярной диффузии около $10^{-5} \text{ м}^2/\text{сут}$. По этой величине можно предположить, что молекулярная диффузия обычно не играет роли при далекой миграции компонентов-загрязнителей. По приближенной оценке В.М. Шестакова, время и расстояние распространения загрязнения в слабопроницаемой среде посредством молекулярной диффузии также незначительны: за 10 сут загрязнение распространяется на 5 см, за 100 сут — на 10 см, за 1000 сут — на 50 см.

Несколько повышена роль молекулярной диффузии в миграции загрязнений в подземных водах, когда $vl/D_M < 1$, где v — скорость фильтрации, $\text{м}/\text{сут}$; l — длина пути фильтрации, м ; D_M — коэффициент молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{сут}$.

Молекулярная диффузия способствует выравниванию концентраций компонентов-загрязнителей в подземных водах соседних участков, характеризующихся разными их концентрациями, однако проявляется только непосредственно вблизи центра загрязнения.

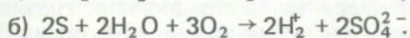
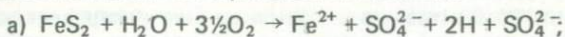
Значительное повышение температуры в твердой фазе оказывает большое влияние на величину коэффициента диффузии. При увеличении температуры на 100° диффузия в твердом теле увеличивается более чем в десятки раз, тогда как в жидкости — самое большое в несколько раз. Так, например, диффузия Cl^{-} увеличивается примерно в 7 раз (от $1,05 \cdot 10^{-5}$ при 0°C до $6,9 \cdot 10^{-5}$ $\text{см}^2/\text{с}$ при 100°C). Вязкость воды соответственно уменьшается примерно в 6–7 раз.

В процессах выщелачивания, развивающихся в системах, представленных подземной водой и твердыми загрязнителями, часто участвуют кислород, а также углекислый газ атмосферного и биогеохимического происхождения.

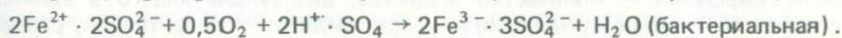
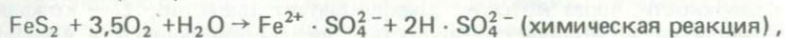
Из различных видов выщелачивания в рассматриваемых системах широко распространено окисление, протекающее с помощью как кислорода, так и органических окислителей. Окислению подвергаются загрязнители, представленные серой и сульфидами металлов; среди последних следует различать моносульфиды и полисульфиды.

Окисление моносульфидов способствует загрязнению подземных вод сульфат-ионом и металлами: $\text{PbS} + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$. Повышается суммарная минерализация подземных вод, но незначительно.

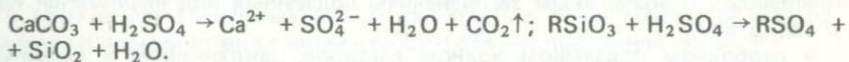
Окисление серы и полисульфидов загрязнителей более сложное и во многих случаях вызывает более серьезные изменения в составе природных подземных вод. Оно протекает по схемам:



При окислении загрязнителей, представленных полисульфидами, наряду с химическими реакциями возможны бактериальные. Часто те и другие протекают постадийно при окислении одних и тех же компонентов-загрязнителей, например:



В ходе окисления серы и полисульфидных загрязнителей, помимо сульфат-иона и металлов, в водах образуется серная кислота, под влиянием которой развиваются процессы сернокислотного выщелачивания карбонатных и силикатных отложений:



Это способствует повышению суммарной минерализации загрязненных подземных вод, увеличению их сульфатной агрессивности и жесткости. Кроме того, эти подземные воды приобретают низкие pH и вследствие этого общекислотную агрессивность. Изменение суммарной минерализации и ионного состава загрязненных подземных вод вследствие процессов окисления сульфидных загрязнителей и сернокислотного выщелачивания карбонатных и силикатных отложений может привести к значительному общему ухудшению качества подземных вод в случае значительных концентраций сульфидных металлов-загрязнителей.

Возможное изменение состава подземных вод при окислении серных и

сульфидных загрязнителей вследствие их широкого распространения (особенно в промышленных районах) — серьезная потенциальная угроза их качеству.

Углекислотному выщелачиванию со стороны подземных вод подвержены загрязнители, представленные карбонатными и силикатными соединениями макро- и микроэлементов. В углекислотном выщелачивании участвует углекислота различного происхождения.

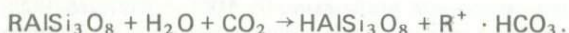
Углекислотное выщелачивание карбонатных загрязнителей протекает по схеме



углекислотное выщелачивание силикатных загрязнителей — по схеме



а также по схеме



В результате углекислотного выщелачивания компонентов-загрязнителей подземная вода загрязняется целым рядом макро- и микроэлементов, карбонат- и гидрокарбонат-ионами, а также кремнекислотой. Вследствие незначительной растворимости силикатных и многих карбонатных соединений-загрязнителей загрязнение подземных вод при этом часто не достигает больших концентраций.

Выщелачивание загрязнителей подземными водами с повышенной ионной силой не имеет широкого распространения, так как лимитируется в зоне интенсивного водообмена локальным развитием минерализованных вод. Загрязнители, подверженные данному процессу, представлены карбонатными и сульфатными соединениями.

Растворению подземными водами подвергаются загрязнители, представленные сульфатными отходами и хлоридами в местах солеразработок и др. Загрязненные подземные воды имеют повышенную минерализацию за счет значительных концентраций главным образом сульфатов, хлора, натрия, кальция. Эти воды обладают сульфатной агрессивностью; в случае повышенных концентраций кальция они жесткие.

В пределах очагов загрязнения в случае, когда загрязнители представлены жидкостями, как отмечалось выше, развиваются процессы их смешения с подземными водами. Сами по себе процессы смешения вызывают загрязнение подземных вод в соответствии с минерализацией, компонентным составом и объемами жидких отходов. Загрязнение подземных вод в результате смешения осложняется нарушением целого ряда равновесий, сопровождаемым выпадением компонентов-загрязнителей совместно с проводными компонентами из подземных вод.

Выпадение компонентов-загрязнителей в осадок из подземных вод связано с образованием слабо растворимых соединений с компонентами подземных вод, а также с достижением пересыщенного их состояния вследствие изменения окислительно-восстановительных или щелочно-кислотных условий.

Слабо растворимые соединения образуют преимущественно компоненты-загрязнители минерального характера (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^-). Их слабо растворимые соединения представлены карбонатами кальция и магния и сульфатом кальция.

О процессе выпадения из загрязненных подземных вод слабо растворимых соединений-загрязнителей можно судить на основании количественной оценки карбонатного и сульфатного равновесий. Процесс выпадения из

загрязненных вод твердого осадка имеет место в случае, если произведение активных концентраций соответствующих ионов (Y/AP) в подземной воде превышает их произведение растворимости. Оценка состояния карбонатного и сульфатного равновесий в загрязненных подземных водах в случаях, когда эти воды имеют высокую минерализацию, затруднена вследствие недостаточности расчетных параметров. Для пресных и слабоминерализованных загрязненных подземных вод расчеты можно считать практически достоверными.

Порядок и правила расчета насыщенности загрязненных подземных вод слаборастворимыми соединениями на примере сульфата кальция представлены ниже.

1. Подготовка расчетных информативных данных. Она заключается в переводе концентрации компонентов из различных форм в моляльную по

формуле $m_i = \frac{x_i \cdot 1000}{(1000 - \Sigma_M) \text{ И.В.}}$, где m_i — число молей компонента в 100 г

H_2O ; x_i — концентрация компонента в граммах на 1000 г раствора; Σ_M — суммарная минерализация раствора в граммах на 1000 г; И.В. — ионный вес компонента; $1000 - \Sigma_M$ — количество чистой воды в 100 г раствора.

2. Расчет ионной силы подземной воды:

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_i m_i z_i^2,$$

где z_i — заряд иона.

3. Определение величины коэффициента активности сульфата кальция $\gamma_{\text{CaSO}_4}^+$ как функции ионной силы по графику или таблице.

4. Расчет произведения активности сульфата кальция:

$$YAP_{\text{CaSO}_4} = \gamma_{\text{CaSO}_4}^+ m_{\text{Ca}} m_{\text{SO}_4}.$$

5. Определение состояния насыщенности загрязненных подземных вод сульфатом кальция:

$$\alpha_{\text{CaSO}_4} = \frac{YAP_{\text{CaSO}_4}}{k_{\text{CaSO}_4}^0},$$

где k^0 — величина термодинамического произведения растворимости сульфата кальция по экспериментальным данным (для $P = 1$ атм и $t^\circ = 25^\circ \text{C}$ $k_{\text{CaSO}_4}^0 = 3,36 \cdot 10^{-5}$).

При $\alpha_{\text{CaSO}_4} = 1$ подземная вода насыщена сульфатом кальция; при $\alpha_{\text{CaSO}_4} < 1$ — не насыщена; при $\alpha_{\text{CaSO}_4} > 1$ — пересыщена.

Расчет насыщенности загрязненных подземных вод карбонатом кальция производится по формуле

$$\alpha_{\text{CaSO}_4} = \frac{\gamma_{\text{HCO}_3^-} m_{\text{HCO}_3^-} \gamma_{\text{Ca}^{2+}} m_{\text{Ca}^{2+}}}{a_{\text{H}^+} \cdot 93,2} \quad (\text{при } P = 1 \text{ атм, } t^\circ = 25^\circ \text{C}),$$

a_{H^+} — активность ионов водорода в воде.

При расчете насыщенности подземных вод карбонатом кальция и магния, помимо данных о ионной силе подземных вод, необходимы сведения о величинах pH воды и насыщенности вод углекислым газом.

Зависимость растворимости карбонатов кальция и магния от содержания углекислоты и концентрации ионов водорода изучалась многими ис-

следователями; одна из последних работ—работа Р.М. Гаррелса и Ч.Л. Крайста [1968].

Выявление возможности образования в загрязненных подземных водах осадков из микрокомпонентов также основывается на растворимости их соединений. Как показано Ф.И. Тютюновой [1978], произведения активности соединений многих микроэлементов колеблются от 4,43 до 35,39. Ею установлена условная граница, отделяющая компоненты, находящиеся в жидкой и твердой фазах. Эта граница соответствует величине активности соединений многих микроэлементов, находящихся в равновесии с осадком, равной 10^{-6} моль/л. По этой величине можно судить об осаждении микроэлементов-загрязнителей из подземных вод. В случае, если содержание активных компонентов-загрязнителей в подземных водах меньше 10^{-6} моль/л, осаждения не ожидается, а если превышает величину 10^{-6} моль/л, оно возможно. При установлении процесса образования осадка микрокомпонентами учитываются конкурирующие ионы (в активных концентрациях); характерные для миграции соответствующих микрокомпонентов диапазоны pH и Eh; макрокомпонентный состав загрязненных подземных вод. Выделены следующие группы соединений микроэлементов с потенциальными возможностями образования осадков и выпадения из загрязненных подземных вод: группа сульфатов ($PbSO_4$), группа хлоридов ($PbCl$), группа фторидов, ($PbClF$), группа фосфатов ($PbHPO_4$), группа карбонатов ($PbCaCO_3$, $CuCO_3$, $ZnCO_3$, $NiCO_3$, $MnCO_3$), группа арсенатов свинца, меди, цинка, никеля, марганца, группа основных солей хлоридов, сульфатов, нитратов, образующихся свинцом, медью, цинком, никелем (например $PbCl_{1,50}(OH)_{0,50}$), группа гидроокисей и окисей свинца, меди, цинка, никеля, железа, марганца.

Ф.И. Тютюновой [1978] приводятся справочные материалы по параметрам образования осадков этих групп.

Рассмотренные выше процессы растворения, выщелачивания, образования твердого осадка возможны также за пределами очагов загрязнения. Характер их при этом не изменяется, но они менее значительны.

Как было показано ранее, выщелачиваются и растворяются за пределами очага загрязнения не загрязнители, а породы под воздействием загрязненных подземных вод, распространившихся из очага загрязнения. Процессы выщелачивания представлены окислением, углекислотным, сернокислотным выщелачиванием и выщелачиванием водами с повышенной ионной силой.

Окислению подвержены терригенные, обогащенные сульфидными минералами породы; углекислотному выщелачиванию — алюмосиликатные терригенные, изверженные, метаморфические, карбонатные породы; сернокислотному — карбонатные и силикатные породы; с повышенной ионной силой — карбонатные и сульфатные породы.

Эти процессы, изменяя состав подземных вод, способствуют возникновению в них свойств жесткости, агрессивности и др.

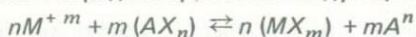
Главными процессами за пределами очагов загрязнения являются сорбционные процессы, способствующие уменьшению концентрации компонентов-загрязнителей или полному их выводу из подземных вод. Эти процессы в значительной степени определяют вне очагов загрязнения возможность процессов растворения, выщелачивания, образования твердых осадков.

Сорбция — один из видов поглощения элементов из подземных вод породами. Подобно многим другим процессам, протекающим между подземной водой и породой, сорбция зависит от концентрационного градиента. Процесс сорбции продолжается до установления равновесия между подземной водой и породой по конкретным компонентам-загрязнителям. Но в

отличие от диффузионных процессов и процессов перехода компонентов из породы в подземную воду (растворения, выщелачивания), интенсивность проявления которых зависит в основном от свойств подземной воды, интенсивность процесса сорбции определяется главным образом свойствами породы. Фактором, определяющим скорость миграции компонентов-загрязнителей из загрязненной подземной воды в породу, является коэффициент распределения k_p — мера адсорбции ионных соединений породой. Большое значение имеет продолжительность контактирования загрязненных подземных растворов с породой. Если компонент-загрязнитель подземных вод контактирует с породой в течение меньшего времени, чем это необходимо для установления равновесия по данному компоненту между водой и породой, то значение k_p будет относиться к неравновесным условиям.

Адсорбция — поглощение из подземных вод ионов поверхностным слоем породы. Адсорбция физическая обусловлена силами межмолекулярного взаимодействия. При химической адсорбции компоненты подземной воды и поверхностного слоя породы образуют химические соединения. В адсорбционных процессах участвуют катионы, что определяется отрицательным зарядом поверхностного слоя породы. Интенсивность адсорбционных процессов зависит от геохимических свойств сорбируемых компонентов-загрязнителей и от геолого-гидрогеологических условий. Из геолого-гидрогеологических условий наиболее существенны удельная поверхность пород и концентрация в подземных водах компонентов-загрязнителей. Зависимость интенсивности адсорбции от этих условий прямая: чем больше удельная поверхность отложений и концентрация компонентов-загрязнителей в водах, тем интенсивнее адсорбция. Адсорбция компонентов-загрязнителей развивается главным образом в грунтовых водах.

В случае, если в поверхностном слое породы содержатся поглощенные катионы, неравновесные с компонентами-загрязнителями подземных вод, адсорбция в системе "загрязненная подземная вода — порода" заменяется ионно-обменным процессом. Ионно-обменный процесс — катионно-обменный. Этот процесс характерен для глинистых пород; рассматриваемый процесс — результат наличия в миграционных системах концентрационного градиента; он самопроизвольный, протекает до установления равновесия и обратимый. Обмен между загрязненным подземным раствором и минералом породы выражается следующим образом:



с константой равновесия

$$k = \frac{[MX_m]^n [A^{+n}]^m}{[M^{+m}]^n [AX_n]^m}$$

При решении задач по миграции компонентов-загрязнителей в случаях, когда их концентрация в подземном растворе ничтожно мала, $[A^{+n}]$ и $[AX_n]$ можно считать постоянными; тогда коэффициент распределения равен

$$k_p = \frac{MX_m}{M^{+m}} \frac{v}{w},$$

где v — объем раствора; w — вес породы.

Катионно-обменные реакции протекают с большими скоростями (время установления равновесия по обменным катионам измеряется минутами).

Характер обмена определяется прежде всего энергией обмена, которая

у различных катионов в равных природных условиях неодинакова и больше у катионов с большей валентностью и большим атомным весом (за исключением водорода, который обладает максимальной энергоспособностью). Количество обменивающихся катионов зависит главным образом от емкости обмена. В связи с этим наиболее существенной характеристикой сорбционной способности пород является их ионная емкость g_0 (число мг-экв ионов, содержащихся в 1 г ионно-обменника и способных к обмену).

Различают два типа емкости. Емкость первого типа — способность удерживать заряженные ионы за счет электростатического взаимодействия; емкость второго типа — стехиометрическая ионно-обменная реакция. Этим путем глинистые минералы обменивают часть своих расположенных внутри кристалла ионов с ионами раствора. Емкость природных минералов колеблется от 1 до 150 мг-экв/100 г.

Емкость обмена для одних и тех же катионов в различных геолого-гидрогеологических условиях неодинакова.

Различие геолого-гидрогеологических условий определяется степенью дисперсности пород и их минералогическим составом. Наибольшей емкостью обмена обладают минералы группы монтмориллонита, меньшей — иллита, минимальной — каолинита. На емкость катионов-загрязнителей в обменных реакциях, протекающих в системе "порода—загрязненная подземная вода", большое влияние оказывает их концентрация в подземных водах. Зависимость емкости обмена от концентрации катиона-загрязнителя в подземной воде, по Н.И. Горбунову, определяется формулой

$$\frac{\sqrt{X^{Ca}}}{X^{Na}} = k \frac{\sqrt{C^{Ca}}}{C^{Na}}. \text{ Помимо названных факторов, емкость обмена любого}$$

данного катиона подземной воды в значительной степени зависит от концентрации ионов водорода, который препятствует обмену; чем больше в воде содержится ионов водорода, тем слабее участвуют в обменных реакциях другие катионы.

Результат адсорбционных процессов — уменьшение концентрации компонентов-загрязнителей в подземных водах и снижение суммарной минерализации воды, результат катионно-обменных процессов — замена компонентов-загрязнителей на катионы естественного для данных условий гидрогеохимического фона (общая минерализация не изменяется, но концентрация компонента-загрязнителя уменьшается).

2.4. Гидрогеохимические аномалии загрязнения

2.4.1. Нормирование качества подземных вод в связи с выявлением аномалий загрязнения

Возникновение гидрогеохимических аномалий загрязнения всегда связано деятельности человека и не связано с природными условиями. Формирование же конкретных свойств гидрогеохимических аномалий загрязнения в каждом случае в значительной степени зависит от геолого-гидрогеологических условий и геохимических свойств подземных вод региона или водоносного комплекса (горизонта).

Гидрогеохимические аномалии загрязнения возникают вследствие проникновения в подземную воду загрязняющих компонентов бытовых, промышленных и сельскохозяйственных отходов.

При возникновении гидрогеохимических аномалий загрязнения компоненты-загрязнители поступают в подземные воды или с атмосферными

Таблица 12
Предельные величины содержания веществ,
обусловливающих вкусовые аномалии подземной воды, мг/л [Посохов, 1975]

Вещество	Вкус			Вещество	Вкус		
	едва ощу- тимый	заметный	неприят- ный		едва ощу- тимый	заметный	неприят- ный
FeSO ₄	1,6	4,8	—	MgSO ₄	250,0	625,0	750,0
NaNO ₃	70,0	205,0	345,0	Na ₂ SO ₄	150,0	450,0	—
NaHCO ₃	415,0	450,0	—	NaCl	165,0	495,0	660,0
CaSO ₄	70,0	140,0	—	MgCl ₂	135,0	400,0	535,0

осадками, или с поверхностными водами, или непосредственно из источников загрязнения.

Гидрогеохимическая аномалия загрязнения — это участок земной коры в пределах одного или нескольких (по вертикальному разрезу) водоносных комплексов, подземные воды которого содержат в тех или иных концентрациях компоненты-загрязнители. Любое малое содержание в подземных водах компонентов-загрязнителей является аномальным, так как отличается от фонового состава подземных вод, сформированного в естественных условиях, свойственных данному региону.

В соответствии с определением загрязнения подземных вод гидрогеохимические аномалии загрязнения следует выделить в две категории: а) аномалии с концентрациями компонентов-загрязнителей в пределах нормированных; б) выше нормированных.

С загрязнением подземных вод связано изменение многих их свойств, нормируемых при использовании подземных вод для питьевых и хозяйственных нужд. В связи с этим главным для гидрогеохимических аномалий загрязнения являются физические свойства, суммарная минерализация, макрокомпонентный и микрокомпонентный составы подземных вод.

К физическим свойствам, учитываемым при использовании подземных вод для водоснабжения, относятся цвет, запах, вкус. Нормами по цвету и запаху является их отсутствие в подземных водах. Подземные воды часто приобретают неприятные запах и цвет вследствие их загрязнения органическими веществами, железом и т.п.

По вкусовым качествам подземные воды делятся на ряд категорий. Подземные воды с неприятным вкусом не используются для хозяйственных, особенно питьевых нужд. Категории подземных вод по вкусовым качествам устанавливаются исходя из содержания веществ, придающих воде разнообразные по характеру и силе вкусовые ощущения (табл. 12).

Самой строгой нормой для суммарной минерализации подземных вод, используемых для водоснабжения, является величина 1 г/л. Отступления носят частный характер, обусловливаемый природными особенностями регионов, неблагоприятными для формирования подземных вод с минерализацией менее 1 г/л. К таким регионам можно отнести аридные области с широким развитием минерализованных подземных вод, где возможно использование вод с минерализацией 1,5 и 3 г/л.

В условиях загрязнения повышение минерализации подземных вод выше 1 и 3 г/л связано чаще всего с высокоминерализованными жидкими промышленными отходами содово-цементного, солеразрабатывающего и других производств.

Макроионный состав подземных вод обуславливает целый ряд свойств, ограничивающих их использование в питьевых и хозяйственных целях. Среди этих свойств наиболее существенны жесткость и агрессивность подземных вод, которые, как было показано в 2.3.3, часто возникают вследствие загрязнения.

Жесткость определяется по суммарному содержанию в подземных водах кальция и магния. Установленная ГОСТом допустимая норма жесткости для питьевых вод — 7,0 мг-экв/л, а для вод технического использования — 6,0 мг-экв/л. Чем больше величина жесткости, тем больший осадок карбонатов кальция и магния образуется при кипячении воды, тем хуже ее качество.

Различают жесткость карбонатную, сульфатную и силикатную. Карбонатная жесткость определяет образование в твердом виде карбонатов кальция и магния. $(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2)$, сульфатная —

↓

сульфата кальция, силикатная — кремнекислых кальция и магния.

Агрессивность подземных вод разнообразна. Различают следующие ее виды: карбонатную, углекислотную, общекислотную, сульфатную, магниевую. Карбонатная агрессивность подземных вод возникает при условии очень малого содержания в них гидрокарбонат-иона, что вызывает выщелачивающую их способность по отношению к бетонам. По ГОСТу, карбонатной агрессивностью обладают подземные воды с содержанием гидрокарбонат-иона менее 0,2 мг-экв/л. Для различных сортов бетона нормы карбонатной агрессивности меняются; так, для портландцементных бетонов — 2,14, для шлаковых портландцементных — 1,07, для пуццолановых — 0,54 мг-экв/л и т.д.

Углекислотная агрессивность подземных вод определяется содержанием в них свободной углекислоты, повышенные количества которой способствуют выщелачиванию бетонов. Агрессивной подземная вода является при содержании в ней CO_2 свободной более 15 мг/л.

Общекислотная агрессивность обусловлена величиной pH. Для разных видов цемента подземные воды, обладающие общекислотной агрессивностью, имеют различную величину pH; например, для пуццолановых агрессивны воды с $\text{pH} < 5$, для шлаковых портландцементов — $< 6,7$, для портландцементных — $< 7,0$ и т.д.

При общерегиональных исследованиях общекислотная агрессивность подземных вод устанавливается по минимальной величине $\text{pH} = 5$. Воды с pH менее 5 обладают общекислотной агрессивностью.

Сульфатная агрессивность свойственна подземным водам, содержащим в повышенных количествах сульфат-ион, образующий хорошо растворимые соединения. Чаще всего сульфатные соединения в подземной воде с сульфатной агрессивностью представлены сульфатом магния. Последний, вступая во взаимодействие с известью бетона, способствует образованию сульфата кальция, который более растворим по сравнению с известью. Вследствие этого происходит разрушение бетона. Самый низкий предел содержания сульфат-иона в подземной воде, придающий ей агрессивные свойства, — 250 мг/л.

Содержание органических веществ в подземных водах питьевого назначения лимитируется по наличию кишечных палочек; допустимо наличие в 1 л воды не более трех кишечных палочек, или одна кишечная палочка должна приходиться на 300 мл. Подземные воды по числу присутствующих в них органических загрязнений делятся на весьма благоприятные, благоприятные и неблагоприятные.

Таблица 13
Стандарты качества питьевой подземной воды по микроэлементам, мг/л

Микроэлементы	Международный (1963 г.)	Европейский (1963 г.)	Микроэлементы	Международный (1963 г.)	Европейский (1963 г.)
Pb	0,05	0,1	Cu	1,5	3,0
As	0,05	0,2	Zn	15,0	5,0
Se	0,01	0,05	Fe	1,0	0,1
Cr	0,05	0,05	Mn	0,5	0,1
Cd	0,01	0,05	F	1,0—1,5	1,5
Ba	1,0	—			

Таблица 14
Максимально допустимые нормы питьевых и хозяйственных вод

№ п/п	Показатель загрязнения	Единица измерения	Максимально допустимые нормы
1	Цвет	<i>mg/dm³</i>	20
2	Мутность	<i>mg/dm³</i>	5
3	pH		6,5—8,5
4	Запах при $t^{\circ} 60^{\circ} C$		Натуральный
5	Соли NH ₄	<i>mgN/dm³</i>	0,5
6	NO ₂	<i>mgN/dm³</i>	10
7	As	<i>mgAs/dm³</i>	0,05
8	Ba	<i>mgBa/dm³</i>	1,0
9	Хлорамины	<i>mg/dm³</i>	2,0
10	Хлорка	<i>mgCl/dm³</i>	300
11	Cr ⁶⁺	<i>mgCr/dm³</i>	0,05
12	Zn	<i>mgZn/dm³</i>	5,0
13	F	<i>mgF/dm³</i>	1,5
14	Cd	<i>mgCd/dm³</i>	0,05
15	Mn	<i>mgMn/dm³</i>	0,1
16	Cu	<i>mgCu/dm³</i>	0,5
17	Pb	<i>mgPb/dm³</i>	0,1
18	Hg	<i>mgHg/dm³</i>	0,001
19	Se	<i>mgSe/dm³</i>	0,05
20	Ag	<i>mgAg/dm³</i>	0,05

Загрязнения микрокомпонентами подземных вод встречаются, по-видимому, чаще, чем нам известно. Причина в том, что пока неточно разработано определение фона по микрокомпонентам. Работы по исследованию распространения микрокомпонентов в подземных водах должны проводиться в регионах промышленного значения, в крупных городах и пр. Как уже указывалось выше, одни микроэлементы (Pb, Hg, Cd, Cu, Zn, Sr) аккумулируются из водной среды в живых организмах, другие (Cd, B, Sn, Sc, Pb, Zn) в аномальных количествах аккумулируются в почвах.

Выявление гидрогеохимических аномалий загрязнения микрокомпонентами — очень важная проблема; в разных странах нормы содержания

микроэлементов в подземных водах хозяйственного значения неодинаковы (табл. 13).

Следует учитывать, что нормы на содержание микроэлементов в подземных водах принимаются не всегда точно и иногда не соответствуют геохимическим условиям регионов, так как в настоящее время региональные исследования распространения микроэлементов в подземных водах пока развиты недостаточно (табл. 14).

2.4.2. Геолого-гидрогеологические условия формирования аномалий загрязнения

Гидрогеохимические аномалии загрязнения формируются компонентами-загрязнителями, характеризующимися большим разнообразием состава и геохимических свойств, а также зависимостей их поведения от природных факторов, таких, как неоднородность среды и разная степень устойчивости загрязняющих веществ в различных средах, химический состав природных подземных вод, гидродинамические условия, литолого-геохимические особенности пород и др. Все это определяет сложность формирования и многообразие черт гидрогеохимических аномалий загрязнения. Особенно большое значение для характеристики гидрогеохимических аномалий загрязнения имеют геолого-гидрогеологические условия их формирования. Влияние геолого-гидрогеологических условий на формирование аномалий загрязнения неразрывно связано с особенностями проявления самого загрязнения — с характером и свойствами загрязняющих веществ, фазовым состоянием их и др.

По фазовому состоянию загрязняющих веществ выделяются категории гидрогеохимических аномалий загрязнения: а) возникающие вследствие загрязнения подземных вод твердыми веществами за счет промышленных отходов из отвалов, мусорных свалок и др.; б) возникающие в результате загрязнения подземных вод жидкими отходами, подтекающими из трубопроводов и хранилищ нефти, стоками промышленных предприятий, канализационными стоками, мазутом и пр.; в) развивающиеся при загрязнении подземных вод промышленными газами, поступающими в подземные воды с инфильтрующими атмосферными осадками.

На участках возможного загрязнения следует ожидать приуроченности аномалий загрязнения преимущественно к отдельным водоносным комплексам; реже они могут быть распространены одновременно в нескольких водоносных комплексах. Последнее наблюдается в случае хорошей гидравлической связи между водоносными комплексами или в случае подвижности вод, слабой адсорбции компонентов-загрязнителей и интенсивного диффузионного распространения компонентов-загрязнителей на большие расстояния. Иногда гидрогеохимические аномалии загрязнения достигают поверхности и отражаются на поверхностных водах. Чаще всего они развиты в двух типах подземных вод: а) в грунтовых водах, приуроченных к четвертичным отложениям континентального и морского генезиса, а также к коренным; б) в подземных водах пластовых слабонапорных водоносных комплексов в зоне активного водообмена.

Четвертичные отложения, в пределах которых чаще всего можно ожидать формирования гидрогеохимических аномалий загрязнения, разнообразны в литолого-геохимическом отношении и по мощности.

Мощность четвертичных отложений находится в значительном диапазоне — от нескольких сантиметров до десятков метров, иногда достигает 200—250 м. Четвертичные отложения на территории Советского Союза представлены современными и древними верхне-, средне- и нижнечетвер-

тичными отложениями. В генетическом отношении среди четвертичных отложений преобладают отложения континентального генезиса, меньше развиты четвертичные отложения морского происхождения. Отложения морского генезиса развиты преимущественно в пределах морских акваторий. В горно-складчатых областях широко распространены пролювиальные и делювиальные отложения. Среди современных отложений наиболее широко развиты болотные озерно-морские и эоловые образования; в долинах рек (руслах, поймах, террасах) распространены аллювиальные отложения.

Среди более древних четвертичных отложений широко распространены ледниковые и флювиогляциальные образования различных стадий оледенения.

В литологическом отношении четвертичные отложения преимущественно терригенные; встречаются также кремнистые, представленные диатомитами, и карбонатные, включающие известковые туфы, гажу, мел биохемогенного происхождения.

По минералогическому составу песчаные отложения подразделяются на кварцевые, полевошпатовые и промежуточные — кварцево-полевошпатовые и полевошпатово-кварцевые. Кварцевые песчаные отложения в генетическом отношении часто флювиогляциальные, эоловые; кварцево-полевошпатовые и полевошпатовые песчаные отложения преимущественно флювиогляциальные, аллювиальные, озерно-ледниковые. Содержание полевых шпатов в этих песчаных отложениях колеблется от первых десятков до 70% и более. Среди полевых шпатов преобладают натриевые и калиевые полевые шпаты. В некоторых случаях полевые шпаты (отдельные зерна) замещаются фельдшпатоидами, образовавшимися при разрушении ледниковых отложений; в других случаях кварцево-полевошпатовые и полевошпатово-кварцевые отложения содержат значительные (до 35—40%) примеси биотита. В целом для всех песчаных отложений независимо от соотношений между кварцем и полевыми шпатами характерно наличие минералов с высоким содержанием красящих окислов. Меньше развиты известковистые песчаные отложения. Существенно известковистые и существенно слюдястые песчаные отложения тяготеют к ледниковым, озерно-ледниковым, реже флювиогляциальным отложениям. В случаях, когда они залегают непосредственно над карбонатными или глинистыми породами, последние присутствуют в песчаных отложениях в виде обломков. Местами формируются фосфатно-кварцевые пески; это случаи, когда морена и озерно-ледниковые образования обогащены фосфатами (фторопатитом, хлоропатитом). В случае участия в формировании четвертичных песчаных отложений изверженных пород пески являются полимиктовыми. Глинистые разности четвертичных отложений принадлежат чаще всего морене. В минералогическом отношении это преимущественно гидрослюдистые, каолинитовые и монтмориллонитовые глины. Гидрослюды могут быть представлены гидрослюдой, гидробиотитом, гидромусковитом. Озерно-морские и озерно-ледниковые глины часто содержат включения вивианита, пирита, кальцита. Глины бывают насыщены метаном, сероводородом, аммиаком, органическим веществом.

Литологические особенности пород, обуславливая характер и интенсивность ряда физико-химических процессов загрязнения, а также разнообразие скоростей фильтрации подземных вод, значительно влияют на размеры, форму, контрастность гидрогеохимических аномалий загрязнения.

Размеры гидрогеохимических аномалий загрязнения в целом характеризуются значительными диапазонами (от нескольких десятков метров до десятков километров).

Размеры гидрогеохимических аномалий загрязнения определяются наряду с миграционной подвижностью компонентов-загрязнителей, обуслов-

ливаемой геохимическими их свойствами, также и природными условиями. В близких природных условиях различные компоненты-загрязнители мигрируют на разные расстояния, в различных природных условиях один и тот же компонент-загрязнитель мигрирует также на разные расстояния. Это обуславливает то, что практически любой отдельной гидрогеохимической аномалии свойственны свои размеры и в пределах отдельной гидрогеохимической аномалии различные компоненты-загрязнители имеют свои площади распространения.

В зависимости от особенностей размещения источников загрязнения подземных вод формируются аномалии разной формы; наиболее возможные формы точечная, линейная, эллипсоидальная, региональная.

Точечные гидрогеохимические аномалии загрязнения связаны с загрязнением при бурении скважин и др.; линейные — с автотранспортным загрязнением, с трубопроводами для нефти и пр.; региональные — с различными загрязнениями в районах городов, с сельскохозяйственными загрязнениями и т.д.; эллипсоидальные формируются под влиянием ветров.

Формы гидрогеохимических аномалий загрязнения зависят также от соотношения процессов, развивающихся и протекающих в миграционных системах, и от региональных гидродинамических условий; в связи с этим формы усложняются и разнообразятся.

Формирование гидрогеохимических аномалий загрязнения протекает в системе "подземная вода — источник загрязнения" путем различных физико-химических процессов массообмена и процессов массопереноса.

Переход компонентов из источника загрязнения в подземную воду под влиянием физико-химических процессов контролируется растворимостью их соединений и удалением от источника загрязнения. Последнее определяется степенью подвижности подземных вод. Конвективный и конвективно-диффузионный массопереносы обеспечивают распространение компонентов по потоку подземных вод. В стороны, вкrest простираения потока, вглубь миграция компонентов может осуществляться молекулярно-диффузионными процессами. Соотношение конвективного и конвективно-диффузионного массопереносов и молекулярной диффузии влияет на конфигурацию гидрогеохимических аномалий загрязнения. Преобладающая форма — вытянутость в направлении движения подземных вод вследствие того, что конвективный и конвективно-диффузионный массопереносы всегда в условиях зоны активного водообмена преобладают над молекулярной диффузией. При больших скоростях фильтрации подземных вод гидрогеохимическая аномалия носит характер водного потока.

Гидрогеохимические аномалии загрязнения классифицируются: а) по степени открытости; б) по степени контрастности; в) по степени достоверности.

Исходя из степени открытости, выделяют открытые и закрытые гидрогеохимические аномалии загрязнения. Открытые гидрогеохимические аномалии загрязнения проявляются на земной поверхности. Причина этого — разгрузка подземных вод в речки, ручьи, озера и пр. Разгрузка возможна в двух различных случаях: а) когда очаги загрязнения залегают выше местных базисов эрозии и незначительно удалены от исследуемого участка; в этом случае разгружаются чаще всего грунтовые воды; б) когда загрязнение подземных вод происходит на удаленных от рассматриваемой территории участках и воды залегают ниже местных базисов эрозии. В этом случае загрязненные подземные воды, как правило, напорные и открытые гидрогеохимические аномалии формируются при их разгрузке в поверхностные водотоки, водоемы и по тектоническим нарушениям. Исследования открытых гидрогеохимических аномалий загрязнения более

просты и экономичны по сравнению с закрытыми, когда требуются для их опробования бурение скважин и проходка другого рода горных выработок.

По степени контрастности гидрогеохимические аномалии загрязнения делятся на контрастные и слабоконтрастные. Контрастные аномалии характеризуются: а) высокими количественными показателями компонентов-загрязнителей; б) значительным набором компонентов-загрязнителей. Они формируются в случае интенсивного загрязнения, а также в природных условиях, способствующих интенсивному проявлению загрязнений. Слабоконтрастные гидрогеохимические аномалии загрязнения характеризуются: а) незначительными количественными показателями компонентов-загрязнителей, которые иногда приближены к фоновым; б) небольшим набором компонентов-загрязнителей. Они формируются в случае слабых источников загрязнения или на значительном расстоянии от источников загрязнения, или в природных условиях, способствующих удалению веществ-загрязнителей из подземных вод.

По степени достоверности гидрогеохимические аномалии загрязнения делятся на достоверные и недостоверные. Недостоверные аномалии являются следствием нескольких причин, но все они природного характера. Так, подземные воды взаимодействуют с регионально распространенными породами, обогащенными рассеянными элементами, и при концентрировании их до определенных пределов становятся непригодными для использования человеком. Концентрированию элементов способствует длительность взаимодействия воды с породами в условиях или слабой подвижности вод, или значительных длин путей фильтрации и т.д. Повышенная концентрация микроэлементов и других веществ наблюдается в грунтовых водах в связи с разгрузкой в них минерализованных глубоких вод по тектоническим нарушениям, литологическим окнам и др. Накопление микроэлементов в подземных водах происходит в условиях аридного климата вследствие локальной разгрузки вод путем испарения на участках неглубокого залегания и пр.

2.4.3. Гидрогеохимические закономерности аномалий загрязнения

Наиболее распространенной особенностью загрязнения подземных вод является относительно небольшое изменение суммарной минерализации при значительном и качественно разнообразном преобразовании компонентного состава. Слабое изменение суммарной минерализации объясняется тем, что подземные воды, которые могут быть подвержены загрязнению, преимущественно пресные, реже слабоминерализованные (только на локальных участках выходов на дневную поверхность галогенных и засоленных сульфатных отложений они имеют высокую суммарную минерализацию). Концентрация веществ-загрязнителей в большинстве промышленных стоков, в инфильтрующихся атмосферных осадках, в водах водотоков и водоемов, питающих подземные воды, также незначительна, хотя есть высококонцентрированные стоки отдельных промышленных предприятий.

По анионному составу природные подземные воды, подверженные загрязнению, чаще всего гидрокарбонатного типа, классов $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$ (суммарная минерализация менее 1 г/л) и $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ (суммарная минерализация может достигать 1–2 г/л) (табл. 15). В зависимости от минералогического состава пород эти воды могут иметь различный катионный состав, однако в большинстве случаев они кальциевые.

Менее распространены подземные воды сульфатного и хлоридного типов. В водах сульфатного типа в случае, когда они принадлежат к классу $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$, суммарная минерализация достигает 1–2 г/л,

Таблица 15

Примеры химического состава подземных вод
грунтового и пластовых водоносных комплексов зоны интенсивного водообмена

Формула химического состава воды (геохими- ческая группа)	pH	ΣM г/л	Ионы, $\frac{\text{мг/л}}{\text{мг-экв/л}}$					
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
			HCO ₃ CaMg	7,5	0,4	7,0 0,2	10,0 0,2	305 5,0
HCO ₃ MgCa	5,8	0,5	7,1 0,2	10,0 0,2	378,2 6,2	0,2 0,05	48,6 4,0	52,0 2,6
HCO ₃ Na	6,6	0,5	8,9 0,2	9,0 0,2	372,1 6,1	143,5 6,2	2,4 0,2	2,0 0,1
HCO ₃ ClNa	7,0	0,9	222,0 6,2	33,0 0,7	384,0 6,3	240,2 10,4	18,1 1,5	26,0 1,3
HCO ₃ SO ₄ CaMg	7,0	0,7	24,9 0,7	215,6 4,5	317,2 5,2	39,5 1,1	34,3 2,8	117,2 5,9
SO ₄ H CO ₃ CaMg	7,5	1,3	29,0 0,8	600,0 12,6	311,2 5,2	23,0 1,0	63,8 5,3	242,5 12,3
SO ₄ Ca	7,3	2,4	18,0 0,6	1492 31,0	207,5 3,4	3,0 0,1	32 2,6	646,3 32,3
SO ₄ NaCaMg	7,0	4,2	63,0 2,0	2675 56,0	293 5,2	807,8 35,3	102 8,2	375,8 18,7

а когда к классу SO₄ > Cl > HCO₃ — 2–5 г/л. В первом случае воды кальциевые, во втором — натриевые.

Подземные воды хлоридного типа класса Cl > HCO₃ > SO₄ имеют суммарную минерализацию в диапазоне 3–5 г/л, класса Cl > SO₄ > HCO₃ — 5–10 г/л. В катионном составе этих вод преобладает натрий.

Исходя из ионного состава и суммарной минерализации подземных вод, подверженных загрязнению, и из наиболее распространенных концентраций загрязняющих веществ, можно предположить, что в результате загрязнений в большинстве случаев не произойдет изменений в геохимических типах подземных вод, редко изменяются геохимические классы. Чаще всего влияние загрязнения ограничивается изменениями в соотношениях между макрокомпонентами или появлением новых макрокомпонентов, что влечет изменения в геохимических группах подземных вод.

Примером изменения химического состава подземных вод на уровне геохимической группы вследствие загрязнения серой может в пределах гидрокарбонатного типа явиться смена вод гидрокарбонатного кальциевого (HCO₃ Ca) состава водами гидрокарбонатно-сульфатного кальциевого (HCO₃ SO₄ Ca) состава.

При загрязнении подземных вод гидрокарбонатно-сульфатного состава хлором могут сформироваться воды гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридного (HCO₃ SO₄ Cl) или гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатного (HCO₃ ClSO₄) состава. В этом случае изменения в составе загрязняющихся подземных вод происходят на уровне классов: воды класса HCO₃ > SO₄ > Cl заменяются водами класса HCO₃ > Cl > SO₄. Если загрязнение хлором значительное, происходит изменение в составе воды на уровне типов; формируются воды хлоридного типа.

Загрязнение подземных вод микрокомпонентами, как правило, не приводит к повышению суммарной минерализации и редко вызывает изменения в их макроионном составе. Последние возникают при окислении загрязняющих веществ, представленных сульфидами и серой, с последующим сернокислотным выщелачиванием известковистых загрязняющих веществ или карбонатных пород.

Загрязнение подземных вод органическими веществами также, как правило, не способствует существенному возрастанию их суммарной минерализации. Случаи резкого, значительного изменения в концентрации макрокомпонентов в составе загрязненных подземных вод и в их суммарной минерализации могут быть связаны главным образом с аварийным характером загрязнения; они имеют преимущественно локальный вид.

Как следует из рассмотренного выше, несмотря на относительно слабые количественные изменения, происходящие в составе подземных вод под влиянием загрязнения, качественные изменения велики. Они заключаются не только в преобразовании компонентного состава, но и в изменении щелочно-кислотных и окислительно-восстановительных условий подземных вод, в изменении карбонатного и сульфатного равновесий и т.д. Следствием этих изменений часто являются новые свойства подземных вод — агрессивность, жесткость и др.

Закономерности поведения загрязнений в подземных водах различных геохимических типов к настоящему времени практически не изучены. Очень мало сведений имеется и относительно закономерностей поведения компонентов природного формирования в подземных водах различных геохимических типов. Литературные сведения о взаимоотношениях между микрокомпонентами, макрокомпонентами и суммарной минерализацией подземных вод малочисленны и противоречивы. Связь между компонентами и суммарной минерализацией подземных вод либо совсем отрицается, либо отрицается только для микрокомпонентов; иногда связь между микрокомпонентами и суммарной минерализацией трактуется для одних и тех же микрокомпонентов или как прямая, или как обратная.

Рассмотрение закономерностей поведения загрязнений в подземных водах тех или иных геохимических типов нами проводится с рядом допущений. Рассматривается поведение загрязнений, представленных преимущественно микрокомпонентами-загрязнителями, главным образом потому, что они более четко выделяются на фоне макрокомпонентного состава незагрязненных подземных вод. Допускается аналогия поведения в подземных водах микрокомпонентов-загрязнителей с микрокомпонентами природного формирования; такого рода аналогия вполне оправдывается единством геохимических свойств микрокомпонентов природного формирования и микрокомпонентов-загрязнителей.

Рассмотрение закономерностей поведения в подземных водах микрокомпонентов-загрязнителей проводится на примере различных геохимических типов, каждый из которых характеризуется конкретным макрокомпонентным составом и суммарной минерализацией.

В подземных водах конкретных геохимических типов микрокомпоненты-загрязнители имеют определенные величины концентраций. По этому признаку микрокомпоненты делятся в общем виде на три группы.

К первой группе относятся микрокомпоненты-загрязнители с резко различной концентрацией в подземных водах разных геохимических типов: стронций, барий, медь, марганец и некоторые другие, близкие к перечисленным по величине заряда, ионному радиусу и ионному весу. Эти микрокомпоненты-загрязнители в минимальных концентрациях

распространяются в подземных водах гидрокарбонатного типа, в максимальных — в водах хлоридного типа, в промежуточных — в водах сульфатного типа. Например, диапазон концентрации стронция (мкл/л) в подземных водах гидрокарбонатного типа 280—4000, сульфатного — 800—15000, хлоридного — 5000—65000; концентрации марганца (мкг/л) в подземных водах гидрокарбонатного типа 40—1000, сульфатного — 80—5000, хлоридного — 600—6000.

Во вторую группу входят микрокомпоненты-загрязнители, предрасположенные к накоплению в минерализованных подземных водах хлоридного типа. К ним относятся бром, бор и некоторые другие микрокомпоненты. Результатом накопления являются относительно большие концентрации этих компонентов и в пресных и в слабоминерализованных подземных водах гидрокарбонатного и сульфатного типов водоносных комплексов зоны интенсивного водообмена. В этих водах они могут мигрировать в количествах, исчисляемых единицами и десятками миллиграммов на литр.

В третью группу входят микрокомпоненты, характеризующиеся близкими величинами концентраций в подземных водах различных геохимических типов, — фтор, свинец и некоторые другие.

Зависимость концентрации микрокомпонентов от суммарной минерализации подземных вод и от содержания в водах макрокомпонентов изучалась с помощью корреляционного анализа для многих регионов Советского Союза; надежность связи оценивалась критерием $r > 3\sigma_r$, а теснота связи — величиной коэффициента ранговой корреляции: $r \geq 0,5$ — связь тесная; $r < 0,5$ — связь слабая.

Оказалось, что характер связи между микрокомпонентами, суммарной минерализацией и макрокомпонентами различен в подземных водах разного анионно-катионного макросостава, но при этом имеют место некоторые общие особенности. Так, практически для всех микрокомпонентов-загрязнителей характерна высокая корреляционная связь с суммарной минерализацией подземных вод. Это позволяет предполагать относительно большие концентрации микрокомпонентов-загрязнителей в подземных водах в случае их повышенной суммарной минерализации (рис. 9). Далее, миграция микрокомпонентов-загрязнителей в повышенных концентрациях приурочена к подземным водам определенного анионно-катионного состава, а сами они тесно связаны в этих водах с главными макрокомпонентами.

Для рассмотрения выбраны следующие группы подземных вод с резко различными геохимическими особенностями:

а) смешанного анионно-катионного состава с суммарной минерализацией до 1 г/л;

б) гидрокарбонатно-хлоридного натриевого и хлоридно-гидрокарбонатного натриевого состава с суммарной минерализацией от 2—3 до 25 г/л;

в) сульфатно-хлоридного натриевого и хлоридно-сульфатного натриевого состава с суммарной минерализацией от нескольких до 150 г/л; они в верхних частях земной коры распространены локально.

В пределах подземных вод первой группы преобладающее число микрокомпонентов-загрязнителей имеют низкие корреляционные связи с макрокомпонентами; величины коэффициентов корреляции между микрокомпонентами и макрокомпонентами часто менее 0,01. Это значит, что миграция микрокомпонентов-загрязнителей в этих подземных водах не зависит от макрокомпонентов вследствие их незначительной концентрации.

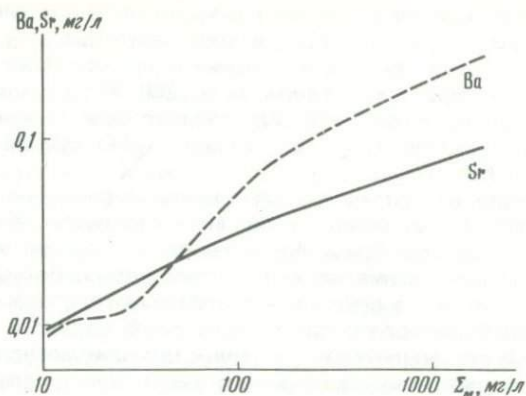


Рис. 9. График регрессии Sr и Ba подземных вод на суммарную минерализацию

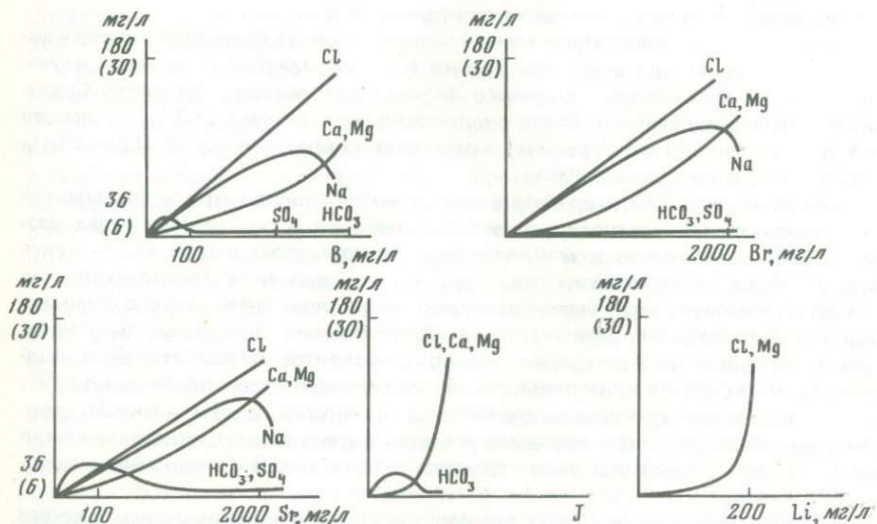


Рис. 10. Взаимораспределение Br, B, J, Li, Sr, Cd, SO_4 , HCO_3 , Na, Mg, Ca в подземных водах

В пределах подземных вод второй группы микрокомпоненты-загрязнители характеризуются тесными корреляционными связями с главными макрокомпонентами, определяющими геохимические особенности вод данной группы, а именно с гидрокарбонат-ионом, натрием и другими катионами. Гидрокарбонат-ион и натрий обуславливают щелочную среду, благоприятствующую миграции в ней таких микрокомпонентов, как бор, йод.

Подземные воды третьей группы являются благоприятными для миграции микрокомпонентов-загрязнителей, характеризующихся значительными связями с хлором и сульфат-ионом. Примером их могут явиться стронций, бром. Значительные концентрации перечисленных макрокомпонентов не ограничивают миграцию стронция, который образует с ними довольно хорошо растворимые соединения.

Приведенные ниже рисунки отражают типичные особенности поведения ряда микрокомпонентов по отношению к макроанионам и катионам подземных вод. Микрокомпоненты представлены бромом, бором, йодом, литием, стронцием; выбор этих микрокомпонентов обусловлен тем, что они могут мигрировать в подземных водах с обширным диапазоном концентраций макрокомпонентов.

Для всех перечисленных микрокомпонентов характерно прямое соотношение с хлором в подземных водах; но для одних микрокомпонентов (бор, бром, стронций) оно прямолинейное, для других (йод, литий) криволинейное (рис. 10).

По характеру соотношения с сульфат- и гидрокарбонат-ионами микрокомпоненты делятся на две группы: а) бром, литий; б) бор, стронций, йод. Бром и литий не проявляют четких взаимосвязей с названными анионами, поскольку гидрокарбонат- и сульфат-ионы образуют с кальцием и магнием слаборастворимые соединения, которые с увеличением суммарной минерализации убывают из подземных вод; в это же время содержание в подземных водах брома и лития увеличивается.

Бор, стронций, йод имеют сложные взаимоотношения с гидрокарбонат-ионом и сульфат-ионом в подземных водах. Так, с гидрокарбонат-ионом имеют прямое соотношение бор (до концентрации около 100 мг/л), йод (до концентрации около 20 мг/л) и стронций (до концентрации около 100 мг/л). Последний имеет прямое соотношение с сульфат-ионом (при более высоких концентрациях этих микрокомпонентов наблюдается уже обратное соотношение). Прямое соотношение обуславливается тем, что подземные воды с повышенными концентрациями данных анионов благоприятны для миграции в них бора, стронция, йода.

По соотношению с макрокатионами рассматриваемые микрокомпоненты также делятся на две группы: а) йод, литий; б) бор, бром, стронций.

Йод и литий в подземных водах с большим диапазоном суммарной минерализации имеют прямое соотношение с кальцием и магнием. Для йода это обуславливается его концентрированием в условиях слабоподвижных подземных минерализованных вод, на что указывают повышенные концентрации кальция и магния. Прямая взаимосвязь между литием, кальцием и магнием является результатом накопления лития в минерализованных водах со значительными концентрациями кальция или магния вследствие того, что литиевые осадочные минералы имеют большую растворимость.

Бор, бром, стронций до определенных концентраций (бор до 1000 мг/л, бром и стронций до 2000 мг/л) характеризуются прямым соотношением с кальцием, магнием, натрием (рис. 10), а при более высоких концентрациях — прямым соотношением с кальцием, магнием и обратным с натрием. Своеобразие и изменчивость соотношений брома, бора, стронция с макрокатионами обуславливаются поведением последних в водах с различной суммарной минерализацией. В водах с относительно большей суммарной минерализацией кальций и магний преобладают над натрием.

Другие микрокомпоненты обнаруживают прямое соотношение с кальцием и натрием в пресных подземных водах, например фтор (рис. 11).

Зависимость поведения микрокомпонентов, как и макрокомпонентов, в подземных водах от pH проявляется практически всегда. Одни из них обнаруживают склонность к миграции в щелочных подземных водах, другие — в кислых (рис. 12, 13).

Для гидрогеохимических аномалий загрязнения характерна горизонтальная зональность, т.е. зональность по площади распространения водоносного комплекса. Она возникает вследствие регионального закономерного умень-

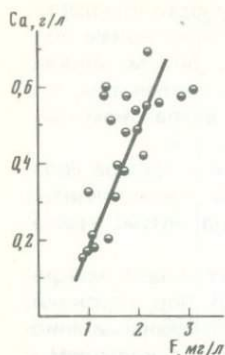


Рис. 11. Зависимость содержания F от Ca в сульфатных кальциевых водах сульфатных пород [Панов, Абдрахманов, 1979]

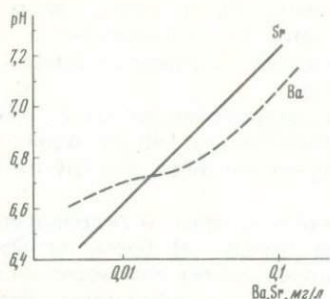


Рис. 12. Зависимость содержания Sr и Ba в подземных водах от pH

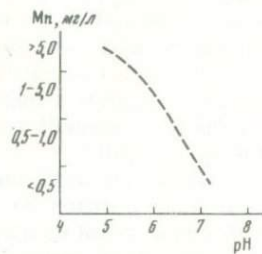


Рис. 13. Зависимость содержания Mn в подземных водах от pH [Славянова, Голицын, 1970]

шения содержания компонентов-загрязнителей в подземных водах по мере удаления от очагов загрязнения в результате адсорбции их породами, рассеяния и разбавления природными водами. Таким образом, аномальные концентрации компонентов-загрязнителей в направлении к периферии участков, занятых гидрогеохимическими аномалиями загрязнения, постепенно снижаются и содержания компонентов-загрязнителей приближаются к фоновым (рис. 14).

Снижение их происходит сложно, своеобразно для отдельных компонентов-загрязнителей, а также для одного вида загрязнений в различных природных обстановках. Так, на степень снижения концентрации загрязненной воды влияет минералогический состав почв и в целом обогащенность почв глинистыми минералами. Глинистые почвы с минералами группы монтмориллонита обладают очень большой емкостью поглощения, а поэтому обеспечивают интенсивное протекание сорбционных процессов; глинистые почвы с минералами группы иллита имеют меньшую емкость и в меньшей степени способствуют сорбционным процессам; глинистые почвы с преимущественным каолинитовым минералогическим составом характеризуются незначительной емкостью поглощения и не способствуют сорбционным процессам.

В снижении в водах концентрации органических загрязнителей существенную роль играют свойства геохимической среды, выраженные через окислительно-восстановительную обстановку. Окислительно-восстановительные условия влияют в большинстве случаев на направление интенсивности процессов, изменяющих концентрацию органических загрязнителей. Выяснено, что наиболее интенсивно и быстро подвергаются окислению загрязненные органическими веществами воды в хорошо аэрируемом слое почвы; особенно это относится к органическим загрязнениям, фильтрующимся через почву, которая богата бактериальной флорой. Например, в слое такой почвы мощностью 30 см происходит снижение концентрации органических соединений фосфора на 95% [Пиннекер, 1979].

Зональность гидрогеохимических аномалий значительно усложняется при региональном распространении источников загрязнения (опыляемые

Рис. 14. Закономерности распространения гидрогеохимических аномалий загрязнения подземных вод барием

1 — гидроизогибса, м; 2 — изолиния фонового содержания бария в подземных водах; 3 — изолиния значения В.П.Ф. для бария, мг/л; 4 — гидрогеохимическая аномалия загрязнения подземных вод барием; 5 — ложная гидрогеохимическая аномалия; 6 — источник загрязнения

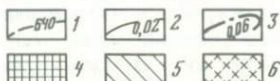
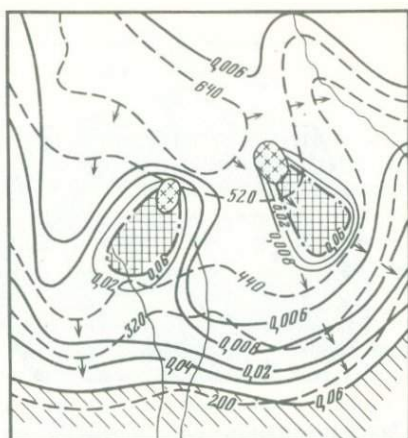
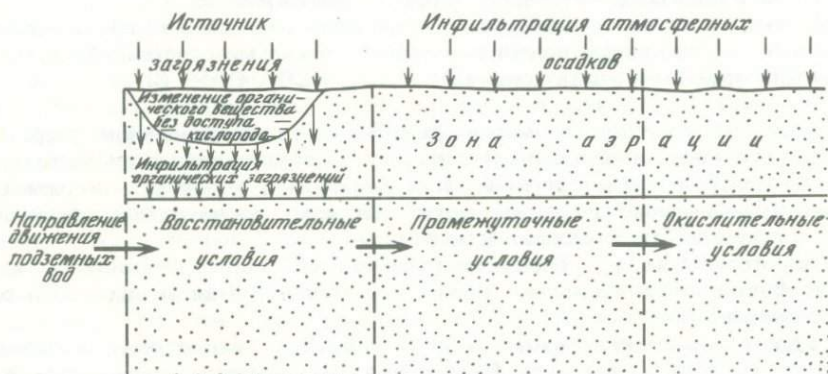


Рис. 15. Пример строения зоны самоочищения воды, загрязненной органическими веществами



лесные массивы, удобряемые сельскохозяйственные угодья и т.д.). В этом случае непосредственно в районах распространения источников загрязнения их концентрация возрастает в подземных водах в направлении движения. И только за пределами районов распространения источников загрязнения она начинает по потоку подземных вод уменьшаться.

В результате окисления органических веществ в зоне аэрации формируются восстановительные среды, и в этих условиях развивается микробиональность, заключающаяся в чередовании восстановительных и окислительных сред. Усилению окисления органических веществ в зоне аэрации способствует разбавление загрязненных вод атмосферными осадками. Пример строения зоны самоочищения воды приведен на рис. 15. Загрязняются подземные воды грунтового водоносного комплекса, сложенного песками. Источник загрязнения — городская свалка; загрязнители представлены органическими веществами. На участке водоносного комплекса, находящегося под свалкой, формируется зона с восстановительными условиями. Ее формирование связано с разложением органических

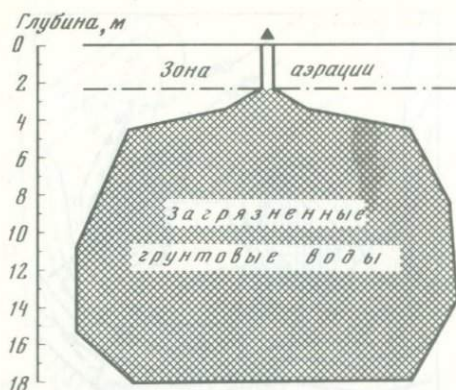


Рис. 16. Пример гидрогеохимической аномалии загрязнения

веществ микроорганизмами, которые связывают свободный кислород, а также кислород минеральных соединений (SO_4^{2-} , NO_3^- и др.).

Характерными компонентами зоны восстановления являются углекислый газ, сероводород, сера, двухвалентное железо, NH_4 , NH_2 , N_2 , NO_2 . В этой зоне происходит значительное, но не окончательное очищение подземных вод от органического загрязнения.

Зона восстановления вытянута от свалки в направлении фильтрационного потока. Далее по направлению движения подземных вод восстановительные условия сменяются окислительными. Смена постепенная, через переходную зону. В переходной зоне появляется кислород, который отсутствует в зоне окисления; присутствуют в значительных количествах бактерии, в воде содержится двух- и трехвалентное железо.

В зоне окисления органические формы загрязнения практически исчезают, и в подземной воде присутствуют только минеральные загрязнения. Для этой зоны характерны SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} .

Гидрогеохимические аномалии загрязнения в вертикальном разрезе чаще всего носят инверсионный характер, выражающийся в аномальном составе подземных вод в верхней части разреза и в фоновом — в нижней. Гидрогеохимические аномалии могут достигать значительной глубины (несколько десятков метров) (рис. 16).

Гидрогеохимические аномалии загрязнения при значительном их разнообразии имеют несколько общих особенностей в характере при рассмотрении в плане.

Гидрогеохимические аномалии загрязнения при рассмотрении в плане можно разделить на два вида. Первый вид аномалий загрязнения характеризуется четко выраженным конкретным, аномальным составом подземных вод, обусловленным одним или комплексом компонентов-загрязнителей. Суммарная минерализация загрязненных подземных вод может быть повышена, но находится в узком диапазоне. Такого характера аномалии формируются при наличии ограниченного числа источников загрязнения.

Для второго вида аномалий загрязнения характерна большая пестрота компонентного состава и суммарной минерализации подземных вод. Последняя колеблется в пределах аномалии от нескольких (первых) сот миллиграммов на литр до 3 г/л. Пестрота компонентного состава выражается в частой смене подземных вод различных геохимических типов, классов, групп. Гидрогеохимические аномалии второго вида типичны для крупных городов с разнообразием источников загрязнения.

2.5. Принципы гидрогеохимического районирования в целях оценки изменения состава подземных вод при загрязнении

Метод районирования широко применяется в гидрогеологии. Выделяются две категории районирования — общее и специальное (табл. 16). Первое — гидрогеологическое районирование, известное как районирование по геолого-структурным признакам. К настоящему времени принципы общего районирования достаточно хорошо разработаны, и оно успешно используется для целенаправленного планирования и проведения гидрогеологических исследований.

Специальное районирование — это районирование территорий в целях проведения узко направленных гидрогеологических исследований. К такого рода исследованиям относятся гидродинамические и гидрогеохимические, в связи с чем выделяются два типа специального районирования (см. табл. 16). Принципы гидродинамического и гидрогеохимического районирования разработаны пока слабо. Тем не менее гидрогеохимическое районирование применяется при решении многих вопросов. Оно подразделяется на два класса — генетическое и прикладное районирование.

Генетическое районирование — районирование территорий по условиям формирования химического состава подземных вод. Оно применяется как самостоятельно, так и при решении практических задач.

Признаками генетического гидрогеохимического районирования являются физико-химические и другие процессы формирования химического состава подземных вод. Каждый процесс или группа процессов характеризуется конкретными сочетаниями действующих в данных природных условиях источников компонентного состава подземных вод и факторов, обуславливающих деятельное состояние этих источников. В земной коре в соответствии с различными видами природных обстановок существуют определенные категории взаимосвязей и взаимоотношений между источниками и факторами, и, следовательно, категории проявления процессов. На этом основании по признаку процессов подземные воды систематизируются в генетические гидрогеохимические типы и подтипы. Различие между типами и подтипами заключается в следующем: в генетический гидрогеохимический тип объединяются подземные воды, характеризующиеся геохимическим единством, являющимся результатом физико-химических процессов. Последние обусловлены сочетанием одного или нескольких источников с группой факторов — климатолого-геоморфологическими, структурно-тектоническими, термодинамическими, гидрогеологическими. В генетический гидрогеохимический подтип в пределах типа выделяются подземные воды определенного геохимического облика, являющегося результатом одного или ограниченного числа процессов, обусловленных относительно узкими рамками геолого-гидрогеологических условий.

Пространственное положение подземных вод, принадлежащих к генетическим гидрогеохимическим типам и подтипам, является основанием для генетического гидрогеохимического районирования.

Гидрогеохимическое прикладное районирование, применяемое при решении вопросов охраны геологической среды, составляет самостоятельную группу исследований (см. табл. 16), но, как правило, оно базируется на результатах генетического районирования, так как воды каждого генетического гидрогеохимического типа — это своеобразная обстановка со свойственными ей условиями проявления антропогенного влияния на подземные воды и окружающую среду.

Таблица 16
Схематизация гидрогеохимического районирования

Категория районирования	Тип районирования	Класс, районирования	Группа районирования	Вид районирования
Общее	Гидрогеологическое на структурно-тектонической основе			
Специальное	Гидрогеохимическое	Генетическое		
		Прикладное	Охрана геологической среды	В связи с загрязнением подземных вод и подземным захоронением промстоков
				В связи с изменением состава подземных вод при эксплуатации для водоснабжения и лечебных вод
				В связи с изменением состава подземных вод при строительстве
				В связи с изменением состава подземных вод при разработке полезных ископаемых
			Поиски гидрогеохимическим методом полезных ископаемых	Поиски рудных полезных ископаемых
				Поиски нефти и газа
				Поиски солей, боратов
				Поиски промышленных вод
		Поиски лечебных вод		
Поиски термальных вод				
Гидродинамическое	Генетическое			
	Прикладное			

Главная особенность метода районирования (генетического и прикладного), отличающая его от метода картирования, — типовой принцип построения карты (картирование основано на территориальном принципе построения карты). Районирование проводится на основе типизации признаков, обуславливающих формирование подземных вод определенного геохимического облика, обладающих всем комплексом показателей, характеризующих с позиций качества возможность их практического использования и влияния на окружающую среду.

В результате типизации выделяются геохимические типы (возможно, и подтипы) подземных вод, пространственное положение которых в пределах исследуемой территории подчиняется особенностям природных условий и геолого-гидрогеологического строения; поэтому подземные воды

определенного геохимического типа часто территориально разобщены и могут быть приурочены к разным участкам территории.

Гидрогеохимическое районирование, относящееся к категории специального, проводимого в целях охраны геологической среды, следует рассматривать как деление территории водоносного комплекса на участки, характеризующиеся единством вод специфического геохимического облика, сформированного при участии антропогенных факторов. Гидрогеохимическое районирование в целях охраны геологической среды осуществляется по нескольким разделам. Главные из них: а) загрязнение подземных вод и изменение химического состава при подземном захоронении промышленных стоков; б) изменение качества воды при эксплуатации для водоснабжения; в) изменение состава вод при гидротехническом и другого рода строительствах; г) изменение состава вод при разработке полезных ископаемых; д) изменение состава вод при мелиорации сельскохозяйственных земель. Каждый из названных разделов составляет самостоятельный вид районирования (см. табл. 16).

Гидрогеохимическое районирование в целях оценки изменения состава подземных вод при загрязнении может выполняться для крупных и малых территорий (в том числе для территорий городов). Оно различается в этих случаях по масштабам детальности, по постановке задач и признакам районирования. Гидрогеохимическое районирование крупных территорий — мелко- и среднемасштабное, а также обзорное, малых территорий — крупномасштабное. Задачи обзорного, мелко- и среднемасштабного районирования следующие: выявление участков расположения загрязненных и незагрязненных подземных вод, установление характера загрязнения, определение местоположения источников загрязнения, путей и способов поступления загрязнения в подземные воды, установление особенностей геолого-гидрогеологического строения участков распространения загрязненных подземных вод.

Основные задачи крупномасштабного районирования: типизация очагов, характера и состава загрязнений, условий поступления загрязнений в подземную воду, типизация геолого-гидрогеологических условий формирования загрязненных подземных вод, типизация подземных вод по степени проявления процессов удаления из них загрязнений, типизация гидрогеохимических аномалий загрязнения, качественно-количественный прогноз изменения концентрации загрязнений в подземных водах.

Главным признаком районирования первой категории является наличие или отсутствие объектов антропогенного загрязняющего характера.

При крупномасштабном районировании основными являются признаки антропогенного и природного характера, направленные на решение вопросов формирования гидрогеохимических аномалий загрязнения и оценки распространения загрязнений в подземных водах.

Формирование гидрогеохимических аномалий загрязнения прежде всего обуславливается возможностью и степенью проникновения загрязнений в подземную воду. С этой целью проводится оценка защищенности подземных вод от загрязнения. При этом в качестве наиболее серьезного природного объекта, обеспечивающего различную степень поступления загрязнений в подземную воду, рассматривается зона аэрации.

Методика составления карты защищенности подземных вод от загрязнения разработана В.М. Гольдбергом, Н.В. Роговской и др. В предлагаемых методиках условия защищенности выражены интенсивностью фильтрации загрязненных атмосферных и поверхностных вод или промышленных стоков через зону аэрации. Учет интенсивности фильтрации загрязненных вод через зону аэрации основывается на распространении слабопроницаемых отложений;

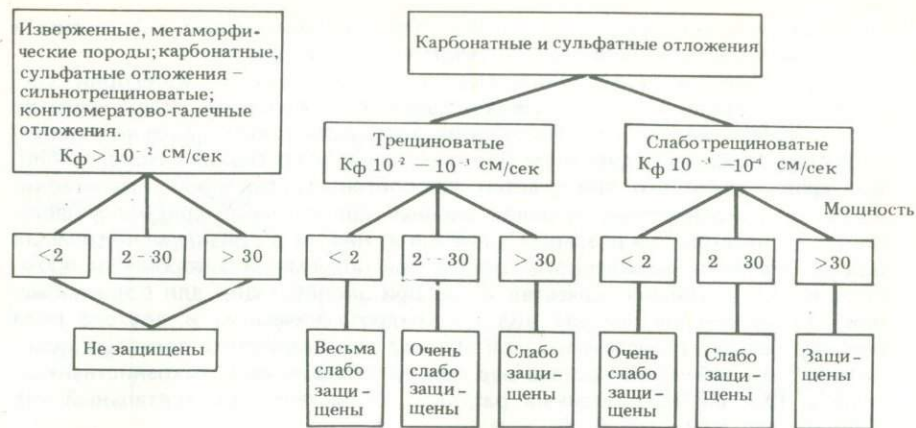


Рис. 17. Схема категорий защищенности подземных вод от загрязнений, фильтрующихся через зону аэрации

территории возможного загрязнения районированы исходя из мощности зоны аэрации и слагающих ее слабопроницаемых отложений.

В настоящее время во многих странах мира составляются карты охраны подземных вод от загрязнения или карты охраны геологической среды, включающие и загрязнение. В их основу положены признаки самоочищения подземных вод от загрязнения, факторы, обуславливающие распространение загрязнений, и сведения об особенностях антропогенного воздействия на подземные воды, включая воздействие загрязнения.

Так, на карте, составленной для территории ГДР, выделяется пять типов районов по самоочищению и миграции загрязненных инфильтрующихся и подземных вод. Признаками выделения районов являются отсутствие, наличие и интенсивность самоочищения. Например, район 1 характеризуется отсутствием или слабым проявлением процессов самоочищения вследствие преобладания карстующихся известняков и сильнотрещиноватых песчаников, район 2 — легкостью поступления загрязнений через зону аэрации и слабым распространением в пределах водоносного комплекса; особенностью района 3 является то, что водоносный комплекс расположен под водоупорными отложениями, но по тектоническим нарушениям есть связь с поверхностью; в этом районе возможно локальное, но резкое загрязнение.

Составлена карта загрязнения подземных и поверхностных вод Польши. На карте показано положение источников загрязнения и проведено районирование территории по степени и условиям ожидаемого загрязнения.

В 1977 г. была составлена карта Франции, отражающая потребности хозяйства в подземных водах и возможности их использования. Последнее оценивается исходя из общегеологических условий; в эту оценку входит и оценка загрязнения подземных вод.

По нашему мнению, немаловажными свойствами зоны аэрации, обеспечивающими ту или иную степень защищенности подземных вод от загрязнения, являются те свойства пород, которые определяют характер и направленность физико-химических процессов, обуславливающих в итоге как перенос загрязнений в подземные воды, так и потерю загрязнений.

К главным свойствам пород, влияющим на физико-химические процессы в системе "загрязненная вода — порода", относятся литолого-мине-



ралого-геохимические особенности, фильтрационные свойства, мощность пород, способствующих протеканию сорбционных процессов.

По сочетанию физико-химических процессов и перечисленных выше свойств пород зоны аэрации выделяются типы зоны аэрации, каждый из которых характеризуется особыми условиями, обеспечивающими различную степень защищенности подземных вод от загрязнений.

Таксономическими единицами районирования территорий по условиям защищенности подземных вод от загрязнения являются районы распространения типов зоны аэрации по условиям поступления загрязнений в подземную воду. Конкретным типам соответствуют конкретные категории защищенности подземных вод от загрязнения.

Принципиальная схема защищенности подземных вод от загрязнения представлена на рис. 17. Исходя из схемы, породы зоны аэрации по фильтрационным свойствам делятся на четыре группы, каждая из которых характеризуется определенными величинами коэффициентов фильтрации. В первую группу входят сильнотрещиноватые изверженные, метаморфические, карбонатные, сульфатные породы, а также конгломератово-галечниковые породы с коэффициентами фильтрации, превышающими 10^{-2} см/с.

Во вторую группу включены карбонатные и сульфатные осадочные породы с коэффициентами фильтрации от 10^{-2} до 10^{-4} см/с. В третью группу входят терригенные песчаные породы с коэффициентами фильтрации, близкими к коэффициентам фильтрации карбонатных и сульфатных пород, но обладающие по сравнению с последними большей удельной поверхностью, а следовательно, способностью к ряду процессов. Четвертую группу составляют глинистые разности терригенных пород с коэффициентами фильтрации менее 10^{-4} см/с. Породы второй и третьей групп подразделяются на две подгруппы. В карбонатно-сульфатных породах выделяются: а) трещиноватые отложения со значительными коэффициентами фильтрации (10^{-2} – 10^{-3} см/с), б) слаботрещиноватые с незначительными коэффициентами фильтрации (10^{-3} – 10^{-4} см/с). В терригенных песчаных породах выделяются: а) крупно- и среднезернистые со значительными коэффициентами фильтрации (10^{-2} – 10^{-3} см/с), б) мелкозернистые с незначительными коэффициентами фильтрации (10^{-3} – 10^{-4} см/с).

Разнообразие фильтрационных свойств пород определяет различие

скоростей фильтрации жидких загрязнений через зону аэрации, что сказывается на длительности протекания различных, в том числе сорбционных, процессов. Чем слабее фильтрационные свойства пород, тем меньше скорость фильтрации жидких загрязнений, тем длительнее процессы удаления загрязнений из вод и тем полнее очищение вод от загрязнений. Чем выше фильтрационные свойства пород, тем больше скорость фильтрации и перенос загрязнений, тем быстрее загрязнения достигают уровня подземных вод.

Физико-химические процессы удаления загрязнений из вод представлены, как было показано выше, адсорбцией, ионным обменом, образованием слаборастворимых соединений. В случае значительного загрязнения органическими веществами развиваются процессы разложения органических веществ с участием кислорода и микроорганизмов.

Физико-химические процессы удаления загрязнений из вод и процессы массопереноса часто взаимосвязаны и протекают в зоне аэрации одновременно, хотя имеются случаи подавляющего преобладания одних над другими.

Случаи подавляющего преобладания процессов удаления загрязнений из вод имеют место при сложении зоны аэрации глинистыми разностями терригенных пород с очень незначительными коэффициентами фильтрации. В этих условиях интенсивно развиваются процессы сорбции, приводящие к резкому уменьшению в загрязненных водах концентрации загрязняющих компонентов.

Подавляющее преобладание процессов массопереноса распространено в сильнотрещиноватых изверженных, метаморфических, карбонатных, сульфатных и других породах с весьма значительными коэффициентами фильтрации. В этих условиях в зоне аэрации практически отсутствуют процессы сорбции и другие процессы, уменьшающие концентрацию загрязняющих компонентов; загрязненные воды свободно переносятся до уровня подземных вод. В обоих случаях состав загрязняющих вод не влияет ни на процессы удаления загрязнений, ни на процессы массопереноса.

В остальных случаях на характере и интенсивности процессов, протекающих в зоне аэрации при миграции загрязнений, отражается состав загрязненных вод. Последние представлены тремя видами. Первый вид — воды, поступающие в зону аэрации от хвостохранилищ, шламохранилищ, прудов-накопителей. Для этих вод характерно неравномерное распределение суммарной минерализации по площади, что объясняется фильтрационной неоднородностью твердых отходов и неоднородным размещением в разрезе хранилищ соединений загрязняющих компонентов, имеющих различную растворимость. Загрязненные воды этого вида имеют незначительную суммарную минерализацию; в них преобладают в качестве компонентов-загрязнителей микрокомпоненты. Второй вид — воды с небольшой суммарной минерализацией, поступающие в зону аэрации от золоотвалов. Третий вид — воды, поступающие в зону аэрации из "белых" морей; они чаще всего высокоминерализованные и представлены хорошо растворимыми неорганическими соединениями:

С учетом особенностей состава загрязненных вод их взаимодействие с различными породами и процессы массопереноса характеризуются следующим образом.

При взаимодействии загрязненных вод первого вида с терригенными песчаными породами происходит сорбция компонентов-загрязнителей мелкими частицами этих пород. В случае крупно- и среднезернистых пород сорбция выражена слабее, чем в случае мелкозернистых, но тем сильнее представлены процессы массопереноса. При взаимодействии с

терригенными песчаными породами загрязненных вод второго вида сохраняется характер фильтрации, свойственный этим породам, а при взаимодействии с данными породами загрязненных вод третьего вида (минерализованных и высокоминерализованных) происходит некоторое уменьшение скорости их фильтрации вследствие повышенной вязкости вод. В целом в условиях загрязнения минерализованными и высокоминерализованными стоками потеря водами компонентов-загрязнителей ощущается слабо даже при малых скоростях фильтрации и система "песчаная порода — загрязненная минерализованная вода" обеспечивает слабую защиту от поступления загрязнений в подземную воду.

Возможность адсорбции карбонатными и сульфатными отложениями обусловлена сорбционными свойствами некоторых разновидностей карбонатных отложений — доломитов, мергелей, а также наличием среди практически несорбируемых известняков гипсов и ангидритов, глинистого цемента.

Взаимодействие загрязненных вод всех трех видов с карбонатными и сульфатными породами зоны аэрации, обладающими различными коэффициентами фильтрации, характеризуется меньшей степенью проявления сорбционных процессов, чем взаимодействие загрязненных вод тех же видов с песчаными породами, имеющими те же коэффициенты фильтрации, но повышенные емкостные свойства. Таким образом, при сложении зоны аэрации карбонатными и сульфатными породами в целом степень защищенности подземных вод от загрязнения ниже, чем при сложении этой зоны песчаными породами.

Как и в случае сложения зоны аэрации песчаными породами, при фильтрации минерализованных и высокоминерализованных загрязненных вод через карбонатные и сульфатные породы защищенность подземных вод от загрязнения выражена слабее, чем в случае фильтрации через эти породы слабоминерализованных загрязненных вод.

Разнообразию в мощностях зоны аэрации при одинаковых фильтрационных свойствах способствует увеличению или уменьшению времени протекания процессов, направленных на изменение концентрации в водах компонентов-загрязнителей. Зону аэрации ориентировочно можно делить на участки с мощностями менее 2 м, от 2 до 30 м, более 30 м.

По совокупности фильтрационных свойств пород и мощностей зоны аэрации формируются среды с различными категориями защищенности подземных вод от загрязнения: а) не защищены; б) весьма слабо защищены; в) очень слабо защищены; г) слабо защищены; д) защищены; е) хорошо защищены; ж) очень хорошо защищены; з) весьма хорошо защищены (см. рис. 17). Формирование подземных вод, относящихся к категории незащищенных, не зависит от мощности зоны аэрации. Мощность зоны аэрации в этих условиях влияет только на время, требующееся для переноса загрязненных вод к уровню подземных вод.

Условия фильтрации загрязненных вод через зону аэрации, сложенную терригенными песчаными отложениями, с учетом разнообразия мощности относятся к следующим категориям защищенности подземных вод: слабо защищены, защищены, хорошо защищены, очень хорошо защищены (см. рис. 17).

Категории защищенности загрязненных вод зоной аэрации, сложенной карбонатными и сульфатными отложениями, как видно из рис. 17, на два порядка ниже, чем категории при условии фильтрации загрязненных вод через терригенные песчаные отложения, а именно: подземные воды весьма слабо защищены, очень слабо защищены, слабо защищены, защищены (см. рис. 17).

Условия фильтрации загрязненных вод через зону аэрации, породы

которой представлены глинистыми отложениями, относятся к самым высоким категориям защищенности подземных вод. При мощности зоны аэрации менее 2 м эти условия составляют категорию очень хорошо защищенных подземных вод, при мощности, превышающей 2 м, — категорию весьма хорошо защищенных подземных вод (см. рис. 17).

При районировании территорий по условиям распространения загрязнений в подземных водах главное внимание обращается на решение прогнозных задач по определению расстояния и времени, в течение которых концентрация загрязняющих компонентов в подземных водах достигнет допустимых норм. Основными процессами, способствующими снижению концентрации загрязняющих компонентов в подземных водах, являются их осаждение из вод в виде труднорастворимых соединений, адсорбция и ионный обмен.

Основные процессы, способствующие распространению загрязняющих компонентов в подземных водах, — процессы массопереноса. Они характеризуются со следующих позиций: а) региональных гидродинамических условий, обуславливающих направление распространения загрязняющих компонентов; б) динамики движения, т. е. скоростей фильтрации, обуславливающих интенсивность распространения загрязняющих компонентов.

Таким образом, признаками районирования территорий по условиям распространения загрязнений в подземных водах являются физико-химические процессы, определяющие уменьшение концентрации компонентов-загрязнителей в водах, и процессы переноса загрязнений подземными водами.

Те и другие зависят от целого ряда факторов: состава и свойств компонентов-загрязнителей, состава и свойств подземных вод, литолого-минералогического состава водовмещающих пород, региональных гидродинамических условий, фильтрационной неоднородности пород.

При составлении карты районирования в целях оценки изменения состава подземных вод при загрязнении учитываются характер источников и пути поступления загрязнений в подземную воду. Их влияние не зависит от геолого-гидрогеологических условий, например: а) загрязнение подземных вод в условиях любого геолого-гидрогеологического региона через атмосферные осадки будет слабее, чем путем инфильтрации жидких стоков из хранилищ; б) загрязнение подземных вод постоянно действующими путями будет более существенно, нежели периодически действующими и случайными, и т. д.

По классификационной схеме, предложенной Е.А. Минкиным, различается пять групп загрязнений подземных вод в зависимости от условий проникновения последних в водоносные комплексы или горизонты: 1) загрязнения, поступающие в подземные воды сверху, не постоянно, с атмосферными и поверхностными водами; 2) поступающие сверху постоянно (в виде промстоков и др.); 3) поступающие сверху из водоносных комплексов с загрязненной водой через гидрогеологические окна, из скважин и пр.; 4) поступающие горизонтально из поверхностных водоемов и водотоков; 5) загрязнения, возникающие в пределах геологической среды.

Районирование территорий по условиям защищенности подземных вод от загрязнения и по условиям распространения загрязнений в подземных водах может проводиться раздельно или вместе. Это определяется степенью изученности территории и задачами исследований. В случае применения при исследованиях загрязнения подземных вод обоих видов районирования оно выполняется в следующей очередности: 1) районирование по условиям защищенности подземных вод от загрязнения; 2) по условиям миграции загрязнений в подземных водах.

При составлении единой карты районирования на ней отражаются: а) принадлежность участков к категориям по защищенности подземных вод от загрязнения; б) пространственное положение подземных вод природных геохимических типов, носящих конкретную информацию об особенностях распространения в них загрязнений; в) местоположение очагов загрязнения, характер загрязнений, пути поступления загрязнений в подземную воду. Карте районирования предшествует составление большого числа рабочих карт, отражающих отдельные геолого-гидрогеологические и гидрогеохимические параметры. Например, в целях установления категорий защищенности подземных вод от загрязнения составляется карта, которая включает геолого-гидрогеологические показатели зоны аэрации, обуславливающие степень проникновения загрязнений до уровня подземных вод. Эти показатели, как было показано выше, представлены фильтрационно-минералогическими особенностями и мощностью пород зоны аэрации. Она также включает физико-химические процессы массообмена и процессы массопереноса, характеризующие итоговую направленность миграции компонентов-загрязнителей через зону аэрации, и др.

В случае, если загрязнение захватывает сразу два или большее число водоносных комплексов, все перечисленные выше характеристики даются для вертикального разреза, представленного этими комплексами. В соответствии с разнообразием условий загрязнения подземных вод по вертикальному разрезу в пределах различных участков территории выделяются виды вертикального разреза. Участки распространения видов вертикального разреза на карте районирования представляют собой районы. Основой выделения видов вертикального разреза является сочетание в разрезе провинций, свойственных каждому отдельно взятому водоносному комплексу.

Глава 3

Исследование изменения качества подземных вод при эксплуатации для водоснабжения

3.1. Типизация геолого-гидрогеологических условий формирования химического состава подземных вод хозяйственно-питьевого значения

Эксплуатация подземных вод для водоснабжения часто сопровождается изменениями в их химическом составе. Степень и характер изменения химического состава подземных вод эксплуатируемых водоносных комплексов в разных случаях различны. Обычно эти изменения небольшие и чаще всего при соблюдении необходимых правил и норм водоотбора не препятствуют использованию подземных вод для питьевых и хозяйственных целей. Однако существуют случаи, когда изменения в химическом составе подземных вод эксплуатируемых водоносных комплексов существенны и воды на эксплуатационных участках становятся малоприспособленными и даже непригодными для водоснабжения.

В процессе эксплуатации подземных вод того или иного водоносного комплекса или горизонта возможно подтягивание к эксплуатационному участку посторонних вод плохого качества или же изменение окислительно-восстановительных и других естественных геохимических условий, отрицательно сказывающихся на составе эксплуатируемых вод, а также поступление в эксплуатируемые воды разного рода загрязнений.

Посторонние воды могут быть представлены: а) подземными водами эксплуатируемого водоносного комплекса, но распространенными за пределами эксплуатационного участка, а поэтому имеющими часто иной, нежели в пределах этого участка, состав; б) подземными водами посторонних водоносных комплексов, гидродинамически связанных с эксплуатируемым водоносным комплексом; в) поверхностными водами; г) водами смешанного типа.

При поступлении в пределы эксплуатационного участка посторонних вод формируется новая гидрогеохимическая обстановка с новыми физико-химическими процессами и водами нового качества. В целом ряде случаев подземные воды нового качества оказываются непригодными для питьевого или технического водоснабжения либо исходя из суммарной минерализации, либо по отдельным показателям (макро- и микрокомпонентам, жесткости, агрессивности).

Главные задачи, возникающие при исследовании преобразования химического состава подземных вод на водозаборных участках, направлены на выявление источников и путей поступления в данный водоносный комплекс подземных и других вод, ухудшающих качество эксплуатируемых вод, на выявление причин изменения окислительно-восстановительных условий, на выявление источников и путей возможного загрязнения эксплуатируемых подземных вод.

Эти задачи при пристальном рассмотрении проблемы детализируются в целый ряд более конкретных и частных задач. Среди них важное значение имеют задачи, связанные с формированием в пределах водозаборных участков эксплуатируемых водоносных комплексов или горизонтов гидрогеохимических аномалий; выяснение природы гидрогеохимических аномалий, их качественных признаков и пространственного положения; установление видов гидрогеохимических аномалий; изучение явления зональности в пределах гидрогеохимических аномалий и др. С ними тесно связана задача типизации геолого-гидрогеологических условий формирования химического состава эксплуатируемых подземных вод.

Особое место при гидрогеохимических исследованиях изменения качества подземных вод при эксплуатации для водоснабжения занимает задача методики картирования мощности зоны пресных подземных вод при региональных гидрогеологических исследованиях, а также задача гидрогеохимического районирования территорий в целях исследования изменения качества подземных вод при их эксплуатации.

К качеству подземных вод, используемых для питьевого и технического водоснабжения, предъявляются особые требования, рассмотренные в 2.4.1. Они включают такие нормированные показатели подземной воды, как физические свойства, суммарная минерализация, макро- и микрокомпонентный состав, жесткость, агрессивность. В дополнение к материалу, представленному по этим показателям в 2.4.1, здесь следует остановиться на нормировании подземных вод по суммарной минерализации.

Для питьевых целей в аридных областях с большим дефицитом пресной воды используются и слабоминерализованные подземные воды; в соответствии с видами водопотребления это могут быть воды с суммарной минерализацией до 3 г/л, которые используются для питьевого водоснабжения, и с суммарной минерализацией свыше 3 г/л (верхний предел 12 г/л), используемые для водопоя скота.

В других регионах земного шара широко распространены подземные воды с суммарной минерализацией менее 0,1 г/л, оказывающие неблагоприятное выщелачивающее действие на организм человека; это регионы с гумидным климатом и весьма активным гидродинамическим режимом.

К ним относятся горно-складчатые области, реже области кристаллических массивов на платформах. Существуют классификации пресных подземных вод по степени благоприятности использования их для питьевого водоснабжения. Например, выделяются воды: 1) с суммарной минерализацией менее 0,1 г/л — неблагоприятные; 2) с суммарной минерализацией в пределах 0,1—0,5 г/л — наиболее благоприятные; 3) с суммарной минерализацией, превышающей 0,5 г/л, — относительно благоприятные для питьевого водоснабжения.

Существенным моментом для прогноза изменения качества подземных вод является установление закономерностей распространения в водоносных комплексах вод с различной минерализацией. Особенно это важно для верхней гидродинамической зоны платформенных областей с гумидным климатом.

Во многих регионах этих областей имеет место смена в направлении фильтрационного потока пресных подземных вод слабоминерализованными вследствие увеличения времени протекания процессов, приводящих к возрастанию концентрации компонентов в подземных водах. Большое внимание при этом следует уделять фильтрационным характеристикам вод; подземные воды с меньшими скоростями фильтрации в пределах конкретного региона сильнее минерализуются по сравнению с подземными водами, обладающими большими скоростями фильтрации.

Подземные воды хорошего качества, удовлетворяющие по всем показателям требованиям водоснабжения, — это воды преимущественно гидрокарбонатного типа классов $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$ и $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$. В анионно-катионном выражении они могут иметь следующий состав: гидрокарбонатный кальциево-магниевый ($\text{HCO}_3 \text{CaMg}$), гидрокарбонатный натриевый ($\text{HCO}_3 \text{Na}$), гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-магниевый ($\text{HCO}_3 \text{SO}_4 \text{CaMg}$), гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-натриевый ($\text{HCO}_3 \text{ClCaNa}$). Возможны и некоторые другие соотношения между ионами в подземных водах, используемых для водоснабжения (табл. 17).

Наиболее распространенными процессами формирования химического состава подземных вод, используемых для водоснабжения, являются те, в ходе которых в водах накапливается гидрокарбонат-ион. Это процессы углекислотного выщелачивания карбонатных (известняков, доломитов и др.) пород и процессы углекислотного гидролитического выщелачивания алюмосиликатных песчано-глинистых континентальных и морских осадочных отложений, а также изверженных и метаморфических пород.

Сульфат-ион в пресных подземных водах гидрокарбонатного типа является, как правило, результатом окисления сульфидных минералов, присутствующих в терригенных осадочных отложениях, в изверженных и метаморфических породах. Поскольку сульфидные минералы чаще всего представлены пиритом (FeS_2), то в ходе его окисления образуется серная кислота, которая при наличии среди водовмещающих отложений карбонатного материала вызывает его сернокислотное выщелачивание, способствующее повышению минерализации воды.

Хлор-ион в используемых для водоснабжения пресных подземных водах формируется в процессе гидролитического выщелачивания песчано-глинистых отложений и изверженных пород, особенно пород и отложений, обогащенных слюдами, и при вымывании из пород морского генезиса ионно-солевого морского комплекса.

Разнообразие катионного состава подземных вод гидрокарбонатного типа определяется минералогическими особенностями водовмещающих пород: в карбонатных известняковых породах преимущественным катионом является кальций, в доломитовых и мергельных — магний и кальций;

Таблица 17

Пример химического состава подземных вод, используемых для водоснабжения

Σ_{M} , г/л	Анионы, мг/л, мг-экв/л, экв %						Катионы,	
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺
0,231	11,28	7,40	250,18			3,0	9,2	57,23
	0,3	0,2	4,1	—	Следы	0,1	0,4	2,9
	3,2	2,15	43,65			1,0	4,25	30,85
0,421	4,0	6,0	278,0	8,0	0,5	—	107,0	4,0
	0,1	0,12	4,56	0,28			4,67	0,22
	1,0	1,0	45,0	3,0			46,5	2,0
0,600	53,0	105,0	476,0	0	0,25	1,2	43,7	109,0
	1,5	2,2	7,8				1,9	5,4
	6,55	9,55	33,9				8,25	23,5
0,221	14,5	8,8	207,46	—	0,01	Нет	43,7	24,52
	0,4	0,2	3,4				1,9	1,2
	5,0	2,5	42,5				23,75	15,0
0,530	13,0	45,2	312,0	—	—	—	3,9	102,0
	0,36	0,94	5,12				0,17	5,12
	2,8	7,3	39,9				1,0	33,0
0,686	11,0	259,0	342,0	24,0	0,1	—	75,87	100,0
	0,3	5,4	5,6	0,8			3,3	5,0
	1,25	22,3	23,15	3,3			13,65	20,65
0,616	22,5	296,2	225,7				5,5	126,25
	0,6	6,2	3,7	—	—		0,1	6,3
	2,85	29,25	17,45				0,45	29,95

в кальциевых алюмосиликатных породах формируются кальциевые, а в натриевых — натриевые подземные воды.

Суммарная минерализация подземных вод различного ионного состава в пределах гидрокарбонатного типа неодинакова, хотя не превышает 1 г/л. Относительно менее минерализованными (Σ_{M} до 0,5 г/л) являются чисто гидрокарбонатные, а также гидрокарбонатные с незначительно повышенным содержанием сульфат-иона или хлор-иона подземные воды. Они формируются преимущественно в областях инфильтрации в водоносные комплексы атмосферных осадков, приуроченных или к водораздельным участкам, или к положительным структурным элементам, частично — в областях транзита. Относительно более минерализованы (Σ_{M} от 0,5 до 1 г/л) подземные воды областей разгрузки, имеющие чаще всего гидрокарбонатно-сульфатный или гидрокарбонатно-хлоридный состав.

В однозначных гидродинамических обстановках (или в областях инфильтрации, или транзита, или разгрузки) подземные воды гидрокарбонатного типа, относящиеся к классу $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$, иногда более минерализованы, чем воды того же типа, но относящиеся к классу $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$. Относительно большая минерализация подземных вод класса $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$ объясняется протеканием наряду с процессами окисления сульфидов металлов процессов сернокислотного выщелачивания пород. Если же в формировании подземных вод класса $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ участвует ограниченное число физико-химических процессов, например преимущест-

мг/л, мг-экв/л, экв %		Fe ²⁺ Fe ³⁺ Fe _{общ.} , мг/л	Жесткость, мг-экв/л		pH	Формула химического состава
Mg ²⁺	NH ₄		общая	устраняемая		
17,36						
1,4	Не обн.	Следы	4,3	4,1	7,35	HCO ₃ CaMg
14,9						
2,0	1,3	0,3	—	—	6,9	HCO ₃ Na
0,17						
1,5						
50,5	0,35	0,3	9,6	7,8	7,5	HCO ₃ п. ClCaMgn. Na
4,2						
18,25						
10,92	0,038	0,15			7,5	HCO ₃ п. ClNaCaMg
0,9			2,1	2,1		
11,25						
30,0	0,8	<0,3	7,56	—	7,3	HCO ₃ п. SO ₄ CaMg
2,44						
16,0						
46,5						
3,8	0,2	0,3	8,8	5,6	7,1	HCO ₃ SO ₄ CaMgNa
15,7						
52,29	—	—	10,6	3,7	7,9	SO ₄ HCO ₃ CaMg
4,3						
20,05						

венно углекислотное гидролитическое выщелачивание пород, то ввиду слабого протекания этого процесса воды приобретают совсем малую минерализацию. В других условиях воды класса $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ могут быть более минерализованы по сравнению с водами класса $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$. Это условия, когда в формировании вод класса $\text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$ принимает участие ионно-солевой морской комплекс пород и подземные воды характеризуются малыми скоростями фильтрации.

Как следует из рассмотренного выше, главными источниками компонентного состава эксплуатируемых подземных вод являются породы. Для правильного учета роли пород в формировании химического состава подземных вод необходимо анализировать соотношение между выносимыми из водовмещающих пород компонентами и физико-химическими процессами в системе "подземная вода — порода". Пример такого соотношения приведен в табл. 18.

Кроме основных компонентов, водовмещающие породы поставляют в подземные воды целый ряд малых компонентов. Все поставляемые породами в подземные воды компоненты можно подразделить на три группы: основные, второстепенные, дополнительные. Территории распространения водоносных комплексов следует делить на участки с породами, которым соответствует набор основных, второстепенных и дополнительных компонентов. Такое деление можно условно принять за литолого-геохимическое райнирование, используемое в качестве основы при выявле-

Таблица 18

Компоненты, выносимые из пород в подземные воды, и основные процессы

Породы	Процессы перехода компонентов в воду					
	Углекислотное выщелачивание	Гидролиз	Окисление	Растворение	Катионный обмен	Биогеохимические процессы
Карбонаты	$\frac{\text{CO}_3}{\text{Ca, Mg}}$					CO_2
Фосфаты 1) железофосфаты 2) апатиты		1. $\frac{\text{PO}_4}{\text{Fe}}$ 2. $\frac{\text{PO}_4, \text{F, Cl}}{\text{Ca}}$				Fe
Диатомиты		$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Fe}}$				
Силициты						
Граниты	Полевые шпаты	$\frac{\text{CO}_3}{\text{Na, Ca}}$	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na, K, Ca, Fe}}$		Na, Cl	
	Слюды	$\frac{\text{CO}_3}{\text{K, Mg}}$	$\frac{\text{SiO}_2, \text{F}}{\text{K, Mg, Fe, Si, Ti, Cr}}$			
Гидрослюды					Na, Ca, Mg	
Сиениты, фельдшпатоиды		$\frac{\text{SiO}_2, \text{Cl, F, SO}_4, \text{CO}_3}{\text{Na, K, Ca, Mg, Fe}}$				
Силикаты (вообще)		$\frac{\text{SiO}_2, \text{F}}{\text{Na, K, Ca, Fe, Mg}}$				
Амфиболы		$\frac{\text{SiO}_2, \text{F}}{\text{Fe, Mg, Na, K, Ca}}$				
Пироксены		$\frac{\text{SiO}_2, \text{F}}{\text{Ca, Mg, Fe}}$				
Гнейсы, сланцы		$\frac{\text{SiO}_2, \text{F}}{\text{K, Mg, Fe, Na, Ca}}$				
Основные породы		$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Mg, Fe}}$			Mg	
Метаморфические (богаты Ca)		$\frac{\text{SiO}_2, \text{Cl, F, SO}_4, \text{CO}_3}{\text{Ca, Mg, Fe, Na}}$				
Соли				$\frac{\text{Cl}}{\text{Na}}$		
Сульфаты				$\frac{\text{SO}_4}{\text{Ca}}$		
Сульфиды			$\frac{\text{S}_2}{\text{Fe}}$			H_2S
Железные руды		Fe				Fe
Торф						$\text{C}_{\text{орг}}, \text{CH}_4, \text{CO}_2, \text{NH}_3$

Примечание. В числителе — анионы, в знаменателе — катионы.

нии генезиса химического состава подземных вод. В табл. 19 приведен пример такого районирования. В качестве единиц районирования выделены провинции, области, подобласти. Все они характеризуются процессами взаимодействия подземных вод с породами и поступающими из пород в подземные воды компонентами. В пределах данного примера пресные воды хорошего качества распространены в условиях, характерных для провинций А, Б, В. Подземные воды, формирующиеся в провинции Г, в большинстве случаев имеют минерализацию выше 1 г/л.

В районах с гумидным климатом наиболее широко распространено несколько типов геолого-гидрогеологических обстановок, обуславливающих формирование подземных вод хорошего качества.

1. Водовмещающие породы изверженные, метаморфические. Подземные воды со значительными скоростями фильтрации; суммарная минерализация часто менее 0,1 г/л; состав гидрокарбонатный, гидрокарбонатный с повышенным содержанием хлора или сульфат-иона, по катионам может быть или преимущественно кальциевым, или магниевым, или натриевым, в зависимости от минералогического состава пород. Процессы: главный — гидролитическое углекислотное выщелачивание (формируются гидрокарбонат-ион, хлор, катионы), дополнительный — окисление сульфидных минералов (формируется сульфат-ион).

2. Водовмещающие породы терригенные силикатные континентального или морского генезиса. Подземные воды с различными скоростями фильтрации; суммарная минерализация часто до 0,1 г/л; состав гидрокарбонатно-кремнистый кальциево-магниевый. Процессы: гидролиз (формируется кремниевая кислота), гидролитическое углекислотное выщелачивание (формируется гидрокарбонат-ион).

3. Водовмещающие породы терригенные алюмосиликатные континентального генезиса. Подземные воды с различными скоростями фильтрации; суммарная минерализация 0,1—0,5 г/л, состав гидрокарбонатный кальциевый или натриевый (в зависимости от минералогического состава алюмосиликатов). Процесс — гидролитическое углекислотное выщелачивание.

4. Водовмещающие породы терригенные алюмосиликатные морского генезиса, четвертичные и дочетвертичные. Подземные воды с различными скоростями фильтрации; суммарная минерализация 0,1—1,0 г/л. Состав гидрокарбонатный в случае или значительных скоростей фильтрации, или положения вод в областях инфильтрации; суммарная минерализация 0,1—0,5 г/л; состав гидрокарбонатно-хлоридный в случае малых скоростей фильтрации или положения вод в удалении от областей инфильтрации; суммарная минерализация 0,5—1,0 г/л. Процессы: гидролитическое углекислотное выщелачивание (формируется гидрокарбонат-ион), вымывание ионно-солевого морского комплекса (формируется хлор-ион).

5. Водовмещающие породы терригенные глинистые морского или континентального генезиса. Подземные воды с малыми скоростями фильтрации; суммарная минерализация 0,5—1,0 г/л; состав гидрокарбонатно-хлоридный, катионный состав зависит от характера ионно-обменных процессов.

6. Водовмещающие породы терригенные с сульфидными минералами. Подземные воды с различными скоростями фильтрации; суммарная минерализация 0,1—0,8 г/л; состав гидрокарбонатно-сульфатный кальциевый или натриевый. Процессы: гидролитическое углекислотное выщелачивание алюмосиликатных минералов (формируется гидрокарбонат-ион), окисление сульфатных минералов (формируется сульфат-ион).

7. Водовмещающие породы карбонатные. Подземные воды с различны-

Таблица 19

Пример литолого-геохимического районирования водоносного комплекса по основным, второстепенным и дополнительным компонентам, исходя из процессов в системах "подземная вода — порода — газ" и "подземная вода — порода"

Провинции	А		Б		
Процессы	Гидролиз, углекислотное выщелачивание		Углекислотное выщелачивание		
Компоненты	SiO ₂ , CO ₃		CO ₃		
Области	I	II	III	IV	
Процессы	Гидролиз и углекислотное выщелачивание натриевых полевых шпатов	Гидролиз и углекислотное выщелачивание кальциевых полевых шпатов	Углекислотное выщелачивание известковых пород	Углекислотное выщелачивание карбонатных пород	
Основные компоненты	SiO ₂ , CO ₃ Na, Ca	SiO ₂ , CO ₃ Ca, Na	CO ₃ Ca	CO ₃ Na, Ca	
Второстепенные компоненты	F, PO ₄ , S ₂ , C Fe, K, Mg	S ₂ , C, H ₂ S, NH ₃ K, Fe, Mg	SO ₄ , Cl, SiO ₂ , C S ₂ , Na, K, Fe, Mg	SiO ₂ , PO ₄ , F, SO ₄ Cl, CO ₂ , Fe, K, Na	
Подобласти, процессы, компоненты	Углекислотное выщелачивание (1)		(Б III 1) Fe, Mg		
	Гидролиз (2)	(А I 2) F, PO ₄ , K, Fe Mg, Ca	(А II 2) K, Fe, Mg	(Б III 2) SiO ₂ , Ca, Na K, Fe	(Б IV 2) SiO ₂ , PO ₄ , Cl, F Na, K, Ca, Fe
	Окисление (3)	(А I 3) Sr, Fe	(А II 3) Sr, Fe	(Б III 3) Sr, Fe	
	Растворение (4)			(Б III 4) SO ₄ , Cl, Ca, Na	(Б IV 4) Cl, SO ₄ , Na, Ca
	Катионный обмен (5)			(Б III 5) Ca, Na, Mg	(Б IV 5) Na, Mg
	Биогеохимические (6)	(А I 6) C _{орг}	(А II 6) C _{орг} , H ₂ S, NH ₃ Fe	(Б III 6) C _{орг}	(Б IV 6) C _{орг} , CO ₂ , SiO ₂ Fe

ми скоростями фильтрации; суммарная минерализация 0,1–0,8 г/л; состав гидрокарбонатный кальциево-магниевый. Процесс — углекислотное выщелачивание.

8. Водовмещающие породы терригенные с сульфидными минералами и карбонатные. Подземные воды с различными скоростями фильтрации; суммарная минерализация 0,5–1,0 г/л; состав гидрокарбонатно-сульфатный. Процессы: гидrolитическое углекислотное выщелачивание терригенных пород, окисление сульфидов и сернокислотное выщелачивание карбонат-

В		Г	
Углекислотное выщелачивание и гидролиз		Растворение и углекислотное выщелачивание	
CO ₃		SO ₄ , CO ₃	
V	VI	VII	VIII
Углекислотное выщелачивание карбонатных пород и гидролиз силикатных пород	Гидролиз силикатных пород, углекислотное выщелачивание карбонатных пород	Растворение гипса и углекислотное выщелачивание известковых пород	Растворение гипса и углекислотное выщелачивание карбонатных пород
CO ₃ Ca, Na	CO ₃ Na, Ca	SO ₄ , CO ₃ Ca	SO ₄ , CO ₃ Ca, Mg
SiO ₂ , Cl, PO ₄ , S ₂ , CO ₂ K, Fe, Mg	SiO ₂ , PO ₄ , Cl, CH ₄ , H ₂ S Fe, Mg, K	CO ₂ Mg	PO ₄ , Sr, H ₂ S Fe
(B V 1) Mg	(B VI 1) Mg	(Г VII 1) Mg	(Г VIII 1) PO ₄
SiO ₂ , PO ₄ K, Fe	SiO ₂ , PO ₄ K, Fe		
(B V 3) Sr Fe			(Г VIII 3) Sr Fe
(B V 4) Cl Na	(B VI 4) Cl Na		
	(B VI 5) Na, Ca, Mg		
(B V 6) CO ₂	(B VI 6) C, CH ₄ , H ₂ S	(Г VII 6) CO ₂ Ca	(Г VIII 6) C, H ₂ S Fe

ных пород. Последние два процесса способствуют формированию сульфатона в подземных водах.

В аридных областях пресные и слабominерализованные подземные воды формируются при выщелачивающем взаимодействии с незасоленными породами. Это воды линзообразного залегания, локально размещенные среди соленых вод или же приуроченные к областям питания в нижних частях склонов гор и к берегам рек.

3.2. Определение мощности зоны пресных подземных вод при региональных гидрогеологических исследованиях

Необходимость определения мощности зоны пресных подземных вод связана с решением вопросов хозяйственного и питьевого водоснабжения. Определение мощности зоны пресных подземных вод в пределах водозаборных участков — весьма сложная задача, но имеющая, как правило, хорошее обоснование фактическим материалом. В этом случае для определения мощности пресных подземных вод пользуются сведениями о положении в вертикальном разрезе вод с различной минерализацией, получаемыми непосредственно по результатам опробования скважин (минерализация вод в одном интервале должна быть менее 1 г/л, в другом — более 1 г/л). Посредством интерполяции этих значений выявляется положение в разрезе каждой скважины подземной воды с минерализацией 1 г/л. Важное значение имеет определение мощности пресных подземных вод крупных территорий в целях оценки преспектив развития хозяйственно-питьевого водоснабжения. В этом случае данные о мощности пресных подземных вод часто являются основой для региональной оценки эксплуатационных запасов вод. Прямым решением задачи по определению мощности зоны пресных подземных вод при региональных исследованиях является картирование граничной поверхности, соответствующей подземным водам с минерализацией 1 г/л и отделяющей подземные воды с минерализацией меньше 1 г/л от подземных вод с минерализацией больше 1 г/л. Отсутствие для многих крупных территорий необходимого количества данных поинтервального гидрогеохимического опробования делает невозможным использование только этого метода для картирования граничной поверхности. В опубликованной и фондовой литературе редко приводятся сведения по методике картирования мощности пресных вод при региональных гидрогеологических исследованиях, что затрудняет оценку достоверности результатов картирования. Опубликованные же сведения, как правило, вызывают по основным положениям возражения, так как не подкрепляются математической обработкой и слабо обоснованы с теоретических позиций. Так, для определения местоположения граничной поверхности между пресными и минерализованными водами используются эмпирические зависимости изменения минерализации с глубиной. Определение глубины положения подземных вод с минерализацией 1 г/л основывается при этом на предположении о равномерном изменении концентрации компонентов в подземных водах с глубиной. В этом случае для расчета достаточно иметь одно значение минерализации подземных вод меньше 1 г/л и значение глубины отбора пробы воды с этой минерализацией. Приняв минерализацию инфильтрующихся атмосферных осадков, т. е. минерализацию воды на поверхности земли, равной нулю, рассчитывается градиент изменения минерализации и по нему определяется глубина, где значение минерализации подземных вод равно 1 г/л.

Такой способ дает объективные результаты в случае линейной зависимости изменения минерализации подземных вод с глубиной.

При региональных исследованиях обширных территорий условия, удовлетворяющие этой зависимости, отмечаются редко, обычно только в отдельных районах, характеризующихся строгим единством гидрогеологической обстановки — однородностью литологического состава и фильтрационных свойств водовмещающих пород и химического состава подземных вод. Некоторые авторы для определения зоны пресных подземных вод предлагают использовать местные и региональные базисы эрозии. Однако граница раздела пресных и минерализованных подземных вод не всегда определяется уровнями эрозионных врезов.

При региональных исследованиях определение мощности зоны пресных вод следует проводить посредством комплексного изучения гидрогеологических условий территории в плане (соотношения участков инфильтрации, потока, разгрузки вод) и в вертикальном разрезе.

При этом важное место принадлежит анализу гидрогеохимической обстановки. Основой для такого анализа служит гидрогеологическая стратификация разреза, т.е. выделение в его пределах водоносных комплексов (горизонтов) и построение карт минерализации подземных вод для каждого выделенного водоносного комплекса (горизонта).

При построении карт учитывается, что формирование всех главных гидродинамических и гидрогеохимических условий отдельно взятого водоносного комплекса (горизонта) происходит в его пределах, исключением является формирование смешанных подземных вод за счет вертикальных перетоков и вследствие загрязнения. На участках, где движение подземных вод носит преимущественно вертикальный характер, изменение минерализации подземных вод характеризуется максимальным градиентом и положение поверхности, отделяющей пресные подземные воды от минерализованных, часто близко к земной поверхности.

В случае, когда водовмещающие породы представлены терригенными и карбонатными отложениями, изменение суммарной минерализации подземных вод по вертикали в пределах отдельных водоносных комплексов незначительное и вертикальный разрез зоны пресных вод может быть сложен несколькими водоносными комплексами. При этом строение зоны пресных подземных вод в деталях в каждом конкретном случае определяется специфическими гидрогеологическими и гидрогеохимическими условиями всей серии водоносных комплексов, входящих в зону пресных вод.

Закономерности формирования степени минерализации подземных вод укладываются в общем виде в несколько типовых схем.

1. Изолированный водоносный комплекс, изотропный по фильтрационным и миграционным параметрам.

В этом случае в подземных водах по мере их движения в результате взаимодействия с породами происходят накопление компонентов до некоторой концентрации насыщения C_H и увеличение суммарной минерализации. В сечении $s = s_0$ в каждую точку водоносного комплекса мощностью m поступает вода с концентрацией C_0 . Распределение концентраций по направлению s , совпадающему с направлением движения подземных вод, описывается уравнением

$$v \frac{dC}{ds} + \gamma (C_H - C) = 0,$$

решение которого имеет вид

$$C = C_H - (C_H - C_0) \exp\left(-\frac{s}{v} \gamma\right),$$

где v — скорость движения подземных вод; γ — коэффициент скорости массообмена.

В каждой точке по вертикальному разрезу в сечении $s = s_L$ концентрация будет иметь значение

$$C_L = C_H - (C_H - C_0) \exp\left(-\frac{L}{v} \gamma\right),$$

т.е. в изотропном изолированном водоносном комплексе должно сохраняться постоянство значений концентраций по вертикали. Следовательно, граница раздела пресных и минерализованных вод близка к вертикальной.

2. Система изотропных изолированных водоносных комплексов.

Для артезианских бассейнов платформенного типа характерно чередование относительно выдержанных водопроницаемых и слабопроницаемых отложений. Для каждого из изолированных водоносных комплексов справедливы закономерности, рассмотренные выше. В общем случае в более глубоких комплексах отмечается повышение минерализации воды, что обусловлено, по-видимому, увеличением в этих комплексах времени взаимодействия вод с породами. Это может быть объяснено ухудшением с глубиной фильтрационных свойств водовмещающих пород, уменьшением градиентов напора, что приводит к уменьшению скорости движения подземных вод и увеличению их минерализации.

Области питания более глубоких водоносных комплексов расположены дальше от рассматриваемого сечения $s = s_L$ по сравнению с менее глубокими, поэтому $L_1 < L_2 < L_3$, т.е. для нижних комплексов увеличивается длина пути фильтрации. Следовательно, при прочих равных условиях минерализация вод возрастает для нижних комплексов.

Таким образом, в системе изолированных водоносных комплексов зона пресных подземных вод носит ступенчатый характер: в пределах каждого водоносного комплекса граница раздела пресных и минерализованных вод вертикальна, а между комплексами близка к горизонтальной.

3. Водоносный комплекс характеризуется закономерным изменением фильтрационных свойств с глубиной.

Ухудшение фильтрационных свойств водовмещающих пород с глубиной вызывает относительно равномерное увеличение минерализации вод вследствие уменьшения скорости их движения. В этом случае необходимо отыскание функциональной зависимости значения минерализации от глубины.

4. Система гидравлически связанных водоносных комплексов.

Для этого случая сохраняются основные закономерности, рассмотренные в типовой схеме 1. Если расход перетекания из нижнего комплекса, содержащего более минерализованные воды, меньше расхода рассматриваемого водоносного комплекса, то в рассматриваемом комплексе не произойдет существенных изменений по сравнению со схемой. В противном случае на формирование состава и минерализации вод рассматриваемого комплекса влияет взаимодействие вод с водовмещающими породами и привнос ряда компонентов в процессе перетекания. Значимость обоих факторов должна обосновываться в каждом конкретном случае особо.

Исходя из изложенного, при определении мощности зоны пресных подземных вод необходимо следующее.

1. Анализ гидрогеологических условий региона в целях гидрогеологической стратификации разреза; выделение водоносных комплексов (горизонтов), характеризующихся единством (близостью) условий формирования химического состава подземных вод; установление границ их распространения.

2. Исследование закономерностей распределения (в плане и в разрезе) минерализации подземных вод каждого водоносного комплекса (горизонта), оценка зависимости изменения минерализации в плане и разрезе путем построения карт и корреляционно-регрессионного анализа. Полученные результаты используются для обоснования единства гидрогеохимических условий выделенных водоносных комплексов (горизонтов).

При выявлении существенной гидрогеохимической неоднородности необходимо дополнительное расчленение разреза.

3. Сравнительный анализ водоносных комплексов (горизонтов) в целях выявления тех, которые входят в зону пресных вод. Объединение в зону комплексов с близкими гидрогеохимическими свойствами.

Сравнительный анализ карт всей серии исследуемых водоносных комплексов позволяет в итоге выделить участки с типовым вертикальным гидрогеохимическим разрезом, отражающим: а) развитие минерализованных вод по всему разрезу; б) развитие пресных вод по всему разрезу; в) развитие пресных вод в части разреза.

4. Картирование мощности пресных вод в изопактах. При этом отмечаются стратиграфическими индексами водоносные комплексы, слагающие зону пресных вод или участки минерализованных вод.

Местоположение в разрезе границы, отделяющей пресные и минерализованные подземные воды, в целом определяется положением кровли лежащего ниже водоносного комплекса, в котором развиты минерализованные воды.

При региональном картировании мощности зоны пресных подземных вод главными факторами являются литолого-геохимические особенности пород и гидродинамические условия.

По особенностям влияния на формирование мощности пресных подземных вод водовмещающие породы, исходя из литологического состава, делятся на следующие группы: 1) карбонатные континентальные терригенные и морские дочетвертичные терригенные; 2) морские четвертичные терригенные; 3) сульфатные; 4) галогенные. Породы первой группы образуют зону пресных подземных вод значительной мощности. На участках, где сложенные этими породами комплексы (горизонты) залегают первыми от поверхности, пресные воды распространены в пределах как областей инфильтрации, так и областей транзита и разгрузки; в более глубоких водоносных комплексах пресные воды в областях разгрузки или вблизи их часто замещаются минерализованными. В случае морских четвертичных терригенных пород пресные воды занимают области инфильтрации и транзита, а в областях разгрузки (и близких к ним областях транзита) часто распространены воды с минерализацией более 1 г/л. Чем более погружен такой водоносный комплекс или горизонт, тем большие площади в областях разгрузки, а также транзита заняты водами с минерализацией, превышающей 1 г/л. В рассматриваемом случае существенное повышение минерализации вод в направлении движения происходит вследствие легко протекающих процессов перевода из пород ионно-солевого морского комплекса.

Подземные воды, приуроченные к сульфатным отложениям, уже в первых от поверхности водоносных комплексах и горизонтах преимущественно минерализованные; пресными они являются только в областях интенсивного инфильтрационного питания. В случае малых скоростей фильтрации уже в областях инфильтрации атмосферных осадков воды имеют минерализацию более 1 г/л. Граница вод с минерализацией < 1 г/л чаще всего оконтуривает области преимущественного питания атмосферными осадками.

Галогенные породы содержат минерализованную воду на любой глубине зоны активного водообмена; мощность пресных вод равна нулю; граница минерализованных вод соответствует границе распространения галогенных пород.

Скорости фильтрации подземных вод оказывают существенное влияние на мощность зоны пресных вод; она уменьшается в случае малых

скоростей фильтрации. При региональном распространении подземных вод с малыми скоростями фильтрации уменьшение мощности зоны пресных вод наблюдается на больших площадях; фильтрационная неоднородность водоносного горизонта или комплекса обуславливает сложное строение зоны пресных вод. При построении изопахит пресных подземных вод необходимо основываться на гидрогеологическом строении и геологоструктурных особенностях исследуемой территории. Так, в случае, когда распространение имеют только пресные воды, их максимальная мощность приурочена к областям инфильтрации; она уменьшается в направлении к областям дренирования и структурным понижениям.

Картирование мощности зоны пресных подземных вод по методике, допускающей совпадение поверхности подземных вод с минерализацией 1 г/л с кровлей того или иного водоносного комплекса, по сравнению с другими методиками более целесообразно, так как не требует большого числа точных цифровых данных.

Данная методика картирования зоны пресных подземных вод допускает максимальное использование геофизических данных для гидрогеологического расчленения разрезов и установления положения в разрезе подземных вод с минерализацией 1 г/л.

Картирование зоны пресных подземных вод можно проводить одновременно по нескольким методикам. Это бывает необходимо при крайне неравномерном и неравноценном фактическом материале, характеризующем зону пресных вод той или иной территории.

При картировании мощности зоны пресных вод следует иметь в виду, что зона пресных подземных вод в областях с различным строением характеризуется резко неодинаковой мощностью. Выделяются: а) горноскладчатые области со значительным диапазоном в мощностях зоны пресных вод на небольших расстояниях; б) кристаллические массивы на платформах с незначительной мощностью зоны пресных вод и слабым ее изменением по площади; в) платформенные области со значительным диапазоном в мощностях зоны пресных вод на значительных расстояниях.

3.3. Формирование гидрогеохимических аномалий при эксплуатации подземных вод

Материалы по химическому составу подземных вод эксплуатируемых участков водоносных комплексов (горизонтов) позволяют отметить наличие во многих случаях четких закономерностей в изменении качества вод в связи с их эксплуатацией. В различных геолого-гидрогеологических условиях при одинаковой (или близкой) интенсивности водоотбора характер гидрогеохимических закономерностей своеобразен. В связи с этим очень важно изучение конкретных причин возникновения на эксплуатируемых участках гидрогеохимических аномалий. Последнее позволяет прогнозировать изменения качества подземных вод на исследуемых водозаборах и на аналогичных по природным условиям прочих водозаборах. Для правильного картирования гидрогеохимических аномалий, формирующихся на участках эксплуатации подземных вод, необходима их генетическая классификация. В общей классификации гидрогеохимических аномалий те аномалии, которые формируются на участках эксплуатации подземных вод для водоснабжения, входят в тип антропогенных аномалий.

В пределах данного типа различаются четыре класса аномалий, формирующихся в результате эксплуатации подземных вод (табл. 20): 1) вызванные нарушением гидродинамических условий; 2) вызванные нарушением геохимических условий; 3) вызванные загрязнением; 4) смешанные.

Гидрогеохимические аномалии каждого класса (кроме смешанных аномалий) подразделяются на виды аномалий.

В первом классе аномалий применительно к участкам водозаборов целесообразно по генетическим признакам выделить следующие виды гидрогеохимических аномалий: аномалии, формирующиеся вследствие поступления в пределы эксплуатационного участка посторонних вод: 1) представленных водами того же водоносного комплекса, 2) представленных подземными водами подстилающих или перекрывающих водоносных комплексов, 3) представленных морскими водами, 4) представленных поверхностными водами водохранилищ.

В пределах аномалий второго класса нарушением геохимического режима могут быть захвачены или только эксплуатируемый водоносный комплекс, или одновременно с ним также зона аэрации. В связи с этим аномалии второго класса подразделяются на виды.

Гидрогеохимические аномалии загрязнения делятся на виды в соответствии с путями поступления загрязнений в подземные воды эксплуатируемого водоносного комплекса.

В пределах отдельных видов гидрогеохимических аномалий по ряду частных признаков выделяются подвиды аномалий. Нарушение гидродинамического режима в пределах эксплуатируемого водоносного комплекса сопровождается смещением эксплуатируемых подземных вод с посторонними; формируется миграционная система "подземная вода данного региона — посторонняя подземная вода". Характерной особенностью подземных вод в этом случае является их принадлежность к водоносным комплексам с различными условиями залегания, а именно к грунтовым, напорным зоны активного водообмена, напорным глубоким частям артезианских бассейнов. Напорные подземные воды зоны активного водообмена — это воды эксплуатируемых водоносных комплексов; напорные подземные воды глубоких водоносных комплексов — это воды, которые могут поступать на водозаборные участки вследствие усиленной эксплуатации. Отсюда огромный диапазон суммарной минерализации и большое разнообразие ионного состава подземных вод, принимающих участие в формировании гидрогеохимической обстановки на участках эксплуатации и формирующихся в ходе эксплуатации. Нередко в формировании миграционных систем при нарушении гидродинамического режима участвуют породы, тогда миграционная система следующая: "смешанная подземная вода—порода". При участии в формировании миграционной системы газов или органических веществ миграционные системы могут быть такими: "смешанная подземная вода—порода—газ", "смешанная подземная вода—порода—органические вещества", "смешанная подземная вода—порода—газ—органические вещества". Можно назвать и другие частные миграционные системы, формирующиеся при нарушении гидродинамического режима водоносных комплексов в ходе их эксплуатации в целях водоснабжения. В миграционные системы, образующиеся при антропогенном нарушении гидрогеохимического режима, обязательно входят подземные воды различного химического состава и газы. Непременное участие в строении рассматриваемых миграционных систем газов вызвано тем, что нарушение гидрогеохимического режима связано с увеличением концентрации газов в подземных водах, или с появлением в них газов, не свойственных данной природной обстановке. Часто нарушением гидрогеохимического режима обуславливается активизация в подземных водах кислорода, углекислого газа, сероводорода.

Подземные воды, оказавшись вследствие антропогенного воздействия в новых геохимических условиях, подобно другим системам, могут взаи-

Таблица 20

Генетическая классификация гидрогеохимических аномалий участков водоотбора

Тип аномалий	Класс аномалий	Вид аномалий	Подвид аномалий	
Аномалии антропогенного формирования	Нарушения гидродинамического режима	Подток подземных вод данного водоносного комплекса		
		Переток подземных вод из посторонних водоносных комплексов	Вышележащих Нижележащих	
		Подток морских вод		
		Подток из водохранилищ		
	Нарушения геохимического режима	Нарушение геохимического режима в водоносном комплексе вследствие изменения уровня подземных вод		Изменение окислительно-восстановительных условий
				Изменение щелочно-кислотных условий
		Нарушение геохимического режима одновременно в зоне аэрации и в водоносном комплексе		Изменение окислительно-восстановительных условий Изменение щелочно-кислотных условий
	Загрязнения подземных вод	С атмосферными осадками		
		С поверхностными водами		
		От источников загрязнения		
Смешанные				

модействовать с породами, органическими веществами, испытывать влияние микроорганизмов. В результате миграционные системы, формирующиеся при антропогенном нарушении гидрогеохимического режима, значительно усложняются.

В целом разнообразие миграционных систем, формирующихся в условиях антропогенного влияния, представленного эксплуатацией подземных вод для водоснабжения, свидетельствует о сложности гидрогеохимических сред, в которых осуществляется миграция компонентов, и о многообразии и разнообразии характера процессов миграции.

Подземные воды гидрогеохимических аномалий, относящихся к классу аномалий, возникающих вследствие нарушения гидродинамического режима, как было сказано выше, формируются главным образом путем смешения вод эксплуатационных участков с посторонними водами (табл. 21). Те и другие представлены природными водами. Разнообразие химического состава вод эксплуатационных участков и посторонних подземных вод обуславливает различные геохимические свойства вод смешения. Тем не менее подземным водам каждого вида гидрогео-

Таблица 21

Примеры изменения химического состава эксплуатируемых подземных вод

Причины изменения состава эксплуатируемых подземных вод		Характер изменения состава эксплуатируемых вод	
Приток вод другого состава	Поверхностных	морских	Увеличение минерализации, содержания хлора, натрия
		речных, озерных, из водохранилищ	Снижение минерализации, повышение концентрации органических веществ, изменение компонентного состава
	Подземных	из данного водоносного комплекса	Увеличение минерализации, содержания сульфат-иона, хлора, натрия
		из подстилающих комплексов из перекрывающих комплексов	Увеличение минерализации, содержания сульфат-иона, натрия Снижение или неизменность минерализации, изменение компонентного состава
Снижение уровня подземных вод и увеличение мощности зоны аэрации	Нарушение окислительно-восстановительных условий		Увеличение минерализации, содержания железа, марганца, сульфат-иона

химических аномалий рассматриваемого класса свойственны определенные геохимические черты, а также физико-химические процессы, сопутствующие смешению.

При подтоке к водозаборному участку подземных вод данного водоносного комплекса могут формироваться аномалии, в пределах которых воды будут иметь или пониженную, или повышенную по сравнению с неизменными подземными водами суммарную минерализацию.

Понижение суммарной минерализации подземных вод может происходить в случае, когда на соседних с водозабором участках вследствие отбора вод усиливается инфильтрация в водоносный комплекс атмосферных осадков. Возможно также усиление продвижения к эксплуатируемому участку более пресных подземных вод от участков водоносного комплекса с большей проницаемостью пород. Опреснение подземных вод может произойти на водозаборном участке и в том случае, когда к нему подтекают воды со стороны области питания данного водоносного комплекса. Наконец, опреснению эксплуатируемых подземных вод способствует подток на водозаборный участок грунтовых или поверхностных вод. В случае понижения суммарной минерализации эксплуатируемых вод, вызываемого их смешением с подтягиваемыми более пресными водами, возможно усиление физико-химических процессов с участием углекислого газа и кислорода, а именно процессов углекислотного выщелачивания и окисления водовмещающих пород. Следствием этих процессов является переход в подземную воду тех или иных компонентов и относительное возрастание минерализации воды. Поэтому формирование гидрогеохимических аномалий при подтоке в пределы эксплуатируемого участка менее минерализованных подземных вод в итоге редко сопровождается существенным снижением минерализации эксплуатируемых подземных вод.

В ионном составе эксплуатируемых подземных вод, как было показано в 3.1, преобладающим является гидрокарбонат-ион, в составе подтягиваемых к эксплуатационному участку более пресных вод — также гидрокарбонат-ион. Поэтому ионный состав вод смешения не отличается от состава эксплуатируемых вод. Наложение на процесс смешения процессов углекислотного выщелачивания пород также не вносит изменений в ионный состав формирующихся вод. Наложение же процесса окисления способствует относительно повышению содержания в водах сульфат-иона.

Повышение суммарной минерализации эксплуатируемых подземных вод происходит часто в случаях, когда водозаборные участки расположены: а) вблизи или в областях дренирования речными долинами и др.; б) вблизи регионального погружения эксплуатируемого водоносного комплекса; в) ниже по потоку от мест, где водовмещающие породы обладают низкими фильтрационными свойствами; г) ниже по потоку от местоположения засульфаченных или засоленных пород. Во всех этих случаях подтекающие подземные воды принадлежат к водоносному комплексу или горизонту, в пределах которого размещен водозабор. При таком положении водозаборных участков влияние вод с повышенной суммарной минерализацией на подземные воды эксплуатируемого участка может проявиться и при неинтенсивном водоотборе. Интенсивный водоотбор способен вызвать подтягивание к водозаборному участку вод с повышенной минерализацией и при более сложном их пространственном взаимоотношении.

Увеличение суммарной минерализации эксплуатируемых подземных вод, как правило, сопровождается изменениями в их ионном составе, а именно переходом их из гидрокарбонатного типа в сульфатный или хлоридный тип.

Ряд изменчивости ионного состава подземных вод на участках водозаборов при увеличении их суммарной минерализации выглядит в общем виде следующим образом: 1) $\text{HCO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3 \text{ п. } \text{SO}_4 \rightarrow \text{HCO}_3 \text{SO}_4 \rightarrow \text{SO}_4 \text{HCO}_3 \rightarrow \text{SO}_4 \text{ п. } \text{HCO}_3 \rightarrow \text{SO}_4$; 2) $\text{HCO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3 \text{ п. } \text{Cl} \rightarrow \text{HCO}_3 \text{Cl} \rightarrow \text{ClHCO}_3 \rightarrow \text{Cl п. } \text{HCO}_3 \rightarrow \text{Cl}$. В более конкретных условиях изменения ионного состава подземных вод ограничены теми или иными отдельными частями приведенных выше рядов. Перечисленные случаи повышения суммарной минерализации эксплуатируемых подземных вод неоднозначны в количественном проявлении. Так, в регионах, сложенных изверженными и метаморфическими породами, подток в пределы водозаборного участка подземных вод даже с очень отдаленных от него и неблагоприятных в гидрогеологическом отношении площадей может повысить суммарную минерализацию эксплуатируемых вод до 0,5–0,8 г/л; воды остаются пресными. В них наряду с гидрокарбонат-ионом увеличивается содержание или сульфат-иона (при окислении сульфидов металлов), или хлор-иона (при выщелачивании слюды и других хлорсодержащих минералов). Ряды изменчивости: $\text{HCO}_3 \rightarrow \text{HCO}_4 \text{ п. } \text{SO}_4 \rightarrow \text{HCO}_3 \text{SO}_4$; $\text{HCO}_3 \rightarrow \text{HCO}_4 \text{ п. } \text{Cl} \rightarrow \text{HCO}_3 \text{Cl}$.

В регионах, сложенных терригенными силикатными породами, изменение минерализации эксплуатируемых вод также не достигает 1,0 г/л; повышается содержание кремнекислоты.

В регионах, сложенных терригенными алюмо-силикатными отложениями континентального генезиса, повышение суммарной минерализации вод водозабора за счет подтока из областей дренирования или от участков пород с низкими фильтрационными свойствами может достигать до 1,0 г/л с небольшим превышением. Если эти породы содержат сульфиды

металлов, то в ионном составе вод с увеличением суммарной минерализации повышается содержание сульфат-иона (ряд изменчивости: $\text{HCO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3$ п. $\text{SO}_4 \rightarrow \text{HCO}_3\text{SO}_4$).

В регионах распространения терригенных отложений морского генезиса, а также представленных глинистыми разностями возможен подток на водозаборные участки вод с минерализацией от 1,0 до 2–3 г/л хлоридного типа. Изменение ионного состава подземных вод на участке водозабора соответствует ряду $\text{HCO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3\text{Cl} \rightarrow \text{ClHCO}_3$.

В регионах распространения засульфаченных пород суммарная минерализация эксплуатационных вод может за счет подтока повыситься до 3–4 г/л, а ионный состав измениться на сульфатно-гидрокарбонатный и сульфатный. Если засульфаченность пород сопровождается засоленностью хлористым натрием, то изменения в ионном составе эксплуатационных подземных вод затрагивают и хлор. Воды могут преобразоваться в сульфатно-хлоридные (SO_4Cl).

В результате увеличения суммарной минерализации и изменения ионного состава эксплуатируемых подземных вод формируются гидрогеохимические аномалии, характеризующиеся превышением норм по минерализации, сульфатной агрессивности, жесткости и др.

При перетоках в пределы эксплуатационного участка подземных вод из подстилающих водоносных комплексов эксплуатируемые подземные воды, как правило, становятся более минерализованными, а при перетоках из перекрывающих водоносных комплексов — или более, или менее минерализованными.

Повышение суммарной минерализации подземных вод при формировании гидрогеохимических аномалий за счет перетока в пределы эксплуатационного участка вод из нижележащих водоносных комплексов, в каждом конкретном случае в зависимости от минерализации перетекающих вод и их объемов происходит в различной степени. Слабо повышается суммарная минерализация эксплуатируемых подземных вод в случае, когда перетекаемые воды незначительно, а также значительно минерализованы, но малы их объемы. Существенное повышение суммарной минерализации подземных вод эксплуатационного участка (участков) происходит при перетоках из подстилающих водоносных комплексов больших объемов минерализованных вод.

Ионный состав подземных вод гидрогеохимических аномалий в случае значительного увеличения их суммарной минерализации часто хлоридный натриевый (а также натриево-кальциевый или натриево-кальциево-магниевый); в случае незначительного увеличения суммарной минерализации — сульфатный кальциевый, сульфатно-гидрокарбонатный кальциево-магниевый. При значительном увеличении минерализации вод они становятся не нормированными по ряду микроэлементов.

Приток к водозаборным участкам подземных вод из вышележащих водоносных комплексов обычно снижает суммарную минерализацию эксплуатируемых подземных вод. Однако в этом случае подземные воды эксплуатационного участка часто становятся хуже по качеству за счет повышения в них концентрации органических веществ, изменения цвета, запаха и т.д.

Повышение суммарной минерализации эксплуатируемых подземных вод при перетоках из вышележащих водоносных комплексов возможно при распространении в них сульфатных или галогенных пород, а также в случаях, когда водосодержащие породы перекрывающего водоносного комплекса относительно слабопроницаемы и имеют значительную мощность.

Возникновению притока в пределы эксплуатируемого участка вод из подстилающих или перекрывающих водоносных комплексов способствуют тектонические дислокации.

Приток воды снизу может быть возбужден эксплуатацией воды в зонах дислокаций краевых частей антиклинальных складок; возникновению перетоков способствуют также неотектонические движения. Приток на территорию водозабора вод из других водоносных комплексов и горизонтов может быть вызван также обширной в плане и по вертикали депрессионной воронкой при слабой изоляции эксплуатируемого водоносного комплекса соседних водоносных комплексов или горизонтов водоупорными породами.

При подтоке в районах морских акваторий в эксплуатируемые подземные воды морских вод, как правило, формируются гидрогеохимические аномалии, воды которых характеризуются повышенной суммарной минерализацией и повышенным содержанием хлора, натрия.

Аномалии, развитые по берегам моря, где интенсивная эксплуатация пресных вод вызывает приток в водоносные горизонты соленых морских вод, известны в районе Балтийского и других морей.

Размеры гидрогеохимических аномалий, формирующихся вследствие нарушения гидродинамического режима при водоотборе, различны и зависят от интенсивности водоотбора, а также от геолого-гидрогеологических условий. Размеры аномалий могут достигать нескольких и даже десятка километров.

Формы рассматриваемых гидрогеохимических аномалий более или менее выдержаны и постоянны. Для аномалий, формирующихся вследствие подтока подземных вод из того же водоносного комплекса, который эксплуатируется, характерна вытянутость по направлению местоположения подтекающих вод. Своей вытянутостью гидрогеохимические аномалии могут располагаться в соответствии с линиями токов подземных вод за пределами воронки депрессии и могут быть не связаны с линиями токов. Гидрогеохимические аномалии, формирующиеся путем перетока подземных вод из нижележащих или вышерасположенных водоносных комплексов, часто имеют округлую форму, повторяющую форму депрессионной воронки. В случае, если очаг перетока является узколокальным, аномалия вытянута в его направлении.

Гидрогеохимические аномалии, формирующиеся вследствие нарушения гидродинамического режима, имеют зональное строение.

Если за центральную часть аномалий принять участок наибольшего антропогенного влияния, соответствующего местоположению водозаборной скважины (скважин), то зональное строение аномалий выразится через увеличение суммарной минерализации подземных вод от центральной ее части; в этом же направлении происходит соответствующее изменение ионного состава. В направлении увеличения суммарной минерализации изменяется соотношение между гидрокарбонат-ионом и сульфат-ионом

или между гидрокарбонат-ионом и хлором. Величины отношений $\frac{r\text{HCO}_3}{r\text{SO}_4}$ и $\frac{r\text{HCO}_3}{r\text{Cl}}$ уменьшаются за счет возрастания содержания в подземных водах сульфат-иона или хлора.

Изменение геохимического режима в пределах эксплуатационных участков водоносных комплексов и горизонтов связано с изменением щелочно-кислотных и окислительно-восстановительных обстановок, происходящим

под влиянием развития депрессионных воронок. Последнее способствует нарушению целого ряда природных геолого-гидрогеологических условий и возникновению антропогенных геохимических сред, образующих гидро-геохимические антропогенные аномалии.

Наиболее существенное влияние на состав подземных вод водозаборных участков оказывают окислительно-восстановительные условия; они определяют возникновение и протекание новых, не свойственных естественным обстановкам водозаборных участков физико-химических процессов, способствующих поступлению в подземные воды этих участков дополнительных компонентов.

Изменение окислительно-восстановительных условий, вызывающее наиболее значительные преобразования в химическом составе эксплуатируемых подземных вод, часто заключается в смене восстановительных условий окислительными. Тогда, в случае наличия в водовмещающих породах или породах зоны аэрации сульфидных минералов, в результате их окисления в водах формируются сульфат-ион и микрокомпоненты (железо и др.), а при окислении полисульфидных минералов — некоторое количество серной кислоты. Это вызывает значительное понижение pH воды (рис. 18). Кислые, содержащие серную кислоту воды активно взаимодействуют с карбонатными и другими породами по схеме сернокислотного выщелачивания и при этом дополнительно обогащаются рядом компонентов и углекислым газом. Последний, в свою очередь, способствует переходу в воду новых порций микрокомпонентов под влиянием их углекислотного выщелачивания. Пример схемы взаимодействия вод с породами в окислительных условиях, возникающих под антропогенным влиянием:



Реакции могут идти и при участии микроорганизмов; некоторые из них обнаружены в водах эксплуатируемых водоносных комплексов многих районов.

Скорость и интенсивность этих процессов зависят от природных условий, кинетики установления гидрогеохимического равновесия, а также от величины развития депрессионной воронки и интенсивности инфильтрационного питания.

Замена восстановительных условий окислительными или же интенсификация окислительных условий в пределах участков водоотбора происходит в узкоспецифических гидрогеологических обстановках, которые в то же время могут довольно часто встречаться. Наиболее распространенными гидрогеологическими обстановками, способствующими возникновению или усилению окислительных свойств подземных вод на участках водоотбора, являются обстановки интенсивного поступления в подземные воды обогащенных кислородом атмосферных осадков. Эти обстановки в пределах эксплуатируемого водоносного комплекса или горизонта развиваются под влиянием депрессионных воронок.

Восстановительные условия свойственны водоносным комплексам или горизонтам со слабым инфильтрационным питанием. Последнее характерно для случаев: а) перекрытия водоносного комплекса или горизонта зоной аэрации, сложенной слабопроницаемыми породами большой мощности; б) сложения водоносного комплекса или горизонта относительно слабопроницаемыми породами; в) удаления соответствующего участка водоносного комплекса или горизонта от областей инфильтрации атмосферных осадков.

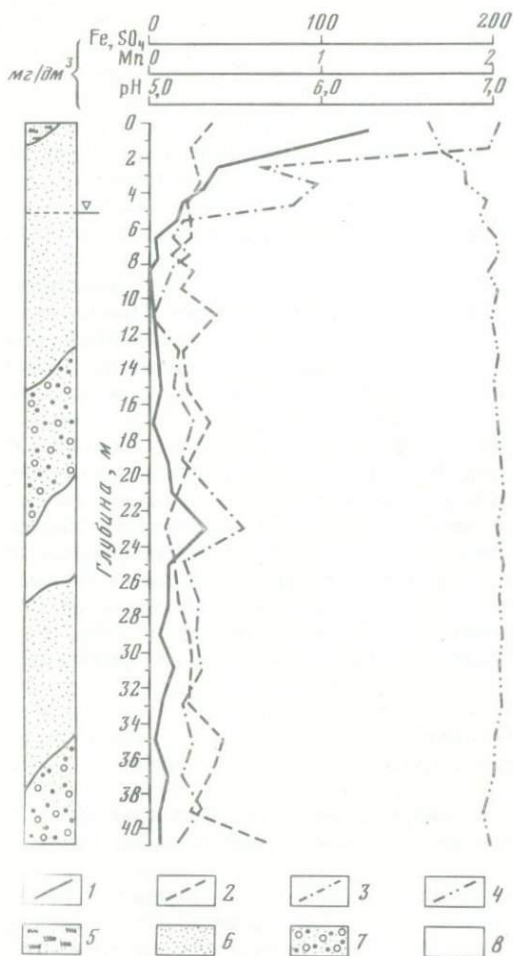


Рис. 18. Изменение состава подземных вод в Варшавско-Берлинской прадолине при смене восстановительных условий окислительными вследствие эксплуатации

1 — Fe; 2 — SO_4 ; 3 — Mn; 4 — pH; 5 — пески пылеватые; 6 — пески мелкозернистые и среднезернистые; 7 — пески разнородные с галькой и гравием; 8 — илы ледниковых отложений

Гидрогеохимические аномалии, являющиеся следствием нарушения геохимического режима, формируются часто в придольных участках водоносных комплексов, распространяясь и на прадолины. В естественных условиях эти участки часто характеризуются малыми мощностями зоны аэрации. Питание водоносного комплекса в этих условиях происходит путем медленной инфильтрации атмосферных вод через почвы, содержащие органические вещества, что определяет существование восстановительной обстановки. Отбор подземной воды и формирование депрессионной воронки вызывают понижение пьезометрического уровня и увеличение мощности зоны аэрации. Происходит нарушение природного гидрогеохимического равновесия вследствие

поступления в водоносный комплекс инфильтрационных вод, обогащенных кислородом, что способствует развитию окислительных условий.

Изменение окислительно-восстановительных условий водоносных комплексов, связанных с антропогенным воздействием, наблюдается на водозаборах в целом ряде прадолин Волги и других рек. Эксплуатация водоносных комплексов в итоге вызывает значительное ухудшение качества подземной воды. Ухудшение качества воды проявляется особенно отчетливо по увеличению ее суммарной минерализации, повышению содержания в подземной воде микрокомпонентов (Fe , Mn , SO_4), по возрастанию свойств агрессивности, жесткости и др. (рис. 19).

Чем более восстановительными условиями характеризуются водоносные комплексы или горизонты при естественном режиме, тем значительнее изменения в химическом составе подземных вод, наступающие в связи с заменой восстановительных условий окислительными. Это показывает, что при детальном гидрогеологическом и гидрогеохимическом изучении участков водозаборов можно прогнозировать изменение химизма воды и его развитие во времени.

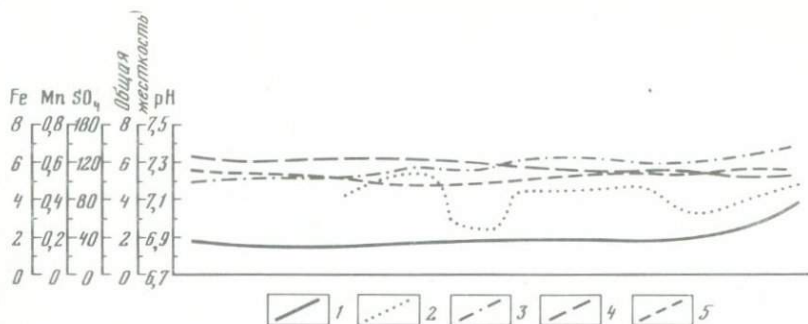


Рис. 19. Изменение состава подземных вод в профиле вследствие эксплуатации
 1 — Fe (общее); 2 — Mn; 3 — SO_4 ; 4 — pH; 5 — жесткость общая, мг-экв

За гидрогеохимические аномалии, образующиеся вследствие изменения окислительно-восстановительных условий на эксплуатируемых участках, могут быть ошибочно приняты участки подземных вод в речных долинах, сложенных отложениями, обогащенными сульфидами металлов. В таких естественных условиях могут появляться локально распространенные подземные воды с повышенной суммарной минерализацией и жесткостью, с высокой агрессивностью и малыми величинами pH.

Смена восстановительных условий окислительными возможна также в случае, когда водозаборные скважины располагаются на участке, в пределах которого зона аэрации сложена слабопроницаемыми глинистыми отложениями. В этой обстановке в первом от поверхности водоносном комплексе преобладают восстановительные условия. Интенсивный отбор подземных вод из водоносного комплекса может способствовать усилению инфильтрации через глинистые отложения атмосферных осадков, обогащенных кислородом.

В районе расположения водозаборов могут формироваться гидрогеохимические аномалии смешанного типа. Они являются чаще всего одновременно результатом нарушения гидродинамического режима и загрязнения. Загрязняющие вещества в виде взвесей и в растворенном виде могут проникать в этих районах в подземные воды из воздуха с атмосферными осадками, а также поверхностными водами. Возможно проникновение загрязнений в подземные воды эксплуатационных участков и в аварийных случаях. Отбор подземной воды и формирование депрессионной воронки увеличивают возможность поступления загрязнений в водоносные комплексы и горизонты.

Пример формирования смешанной гидрогеохимической аномалии в пределах эксплуатационного участка вследствие подтягивания в депрессионную воронку загрязнений от хранилища промстоков показал, что в течение трех месяцев отбора воды из водозаборных скважин с этого участка исчезли подземные воды с суммарной минерализацией менее 3 г/л; более обширные площади оказались занятыми подземными водами с суммарной минерализацией более 5 г/л.

Существенное значение имеет загрязнение подземных вод эксплуатируемых водоносных комплексов посредством подтягивания в пределы эксплуатационных участков загрязненных поверхностных вод.

Смешанные гидрогеохимические аномалии, в формировании которых участвуют загрязнения, представляют собой сложные физико-химические системы, в которых подземные воды под влиянием загрязняющих компо-

нентов приобретают новые качества. В целом ряде случаев эти качества оказываются неблагоприятными для использования вод в целях водоснабжения. Различные загрязнения сказываются неодинаково на качестве подземных вод. При попадании в эксплуатируемые подземные воды бытовых стоков загрязнение чаще всего слабое, и редко содержание отдельных компонентов в таких водах превышает норму. При загрязнении подземных вод разного рода сельскохозяйственными загрязнителями часто создается угроза превышения по этим загрязнителям допустимых норм. Объясняется это тем, что среди сельскохозяйственных загрязнителей имеют место ядохимикаты, присутствие которых в водах даже в самых незначительных количествах делает воду непригодной для водоснабжения.

В случае загрязнения подземных вод высокоминерализованными сточными водами подземные воды становятся непригодными для водоснабжения и других хозяйственных нужд, прежде всего по суммарной минерализации. Такие стоки имеют локальное распространение.

3.4. Гидрогеохимическое районирование в целях прогноза изменения качества подземных вод при региональных гидрогеологических исследованиях

Существуют две категории прогноза изменения качества подземных вод: 1) детальный прогноз для конкретных водозаборов, в котором широко используются гидродинамические методы расчетов; результатом прогноза является количественная оценка изменения минерализации подземной воды на тот или иной период времени, а также пространственного изменения; 2) общий региональный прогноз, учитывающий на случай эксплуатации подземных вод возможности конкретного изменения их химического состава, свойственного определенным геолого-гидрогеологическим условиям.

Целью регионального прогноза является выделение районов, в которых эксплуатация подземных вод может привести к изменениям их качества. Этот вид прогноза используется для планирования развития промышленности и сельского хозяйства. На основе данного прогноза можно определить размеры зоны санитарной охраны водозаборов, произвести оценку допустимых дебитов скважин и т.д.

При составлении регионального прогноза обязателен элемент районирования; поэтому прогноз изменения качества подземных вод при региональных гидрогеологических исследованиях, охватывающих обширные территории и предназначенных для их оценки с точки зрения хозяйственно-питьевого водоснабжения, представляет собой гидрогеохимическое районирование специального назначения.

Гидрогеохимическое районирование в целях прогноза изменения качества подземных вод при региональных гидрогеологических исследованиях можно проводить для района распространения отдельного водоносного комплекса, а также для территории распространения в вертикальном разрезе серии водоносных комплексов.

Гидрогеохимические аномалии, связанные с водоснабжением, следует рассматривать с позиций: 1) возникновения; 2) формирования.

Как было показано выше, возникновение гидрогеохимических аномалий на эксплуатационных участках всегда связано с отбором воды, т.е. с деятельностью человека. Формирование же конкретных свойств каждой гидрогеохимической аномалии в значительной степени определяется геолого-гидрогеологическими условиями эксплуатируемого водоносного комплекса на эксплуатационном участке и за его пределами.

За признак районирования принимается генезис гидрогеохимических аномалий. В соответствии с генетической систематизацией гидрогеохимических аномалий, возникающих в районах хозяйственно-питьевого водоснабжения, в основе районирования лежат аномалии, формирующиеся: 1) вследствие нарушения гидродинамического режима; 2) вследствие нарушения геохимического режима; 3) вследствие одновременного воздействия первых двух причин, а также загрязнения.

При рассматриваемом гидрогеохимическом районировании следует учитывать следующие гидрогеологические показатели: характер и интенсивность питания эксплуатируемого водоносного комплекса атмосферными осадками и поверхностными водами: наличие и характер связи эксплуатируемых водоносных комплексов с земной поверхностью; гидродинамические условия водоносного комплекса, скорости фильтрации подземных вод; пространственные гидрогеохимические закономерности.

Гидрогеологические показатели водоносных комплексов следует рассматривать применительно к формированию: а) гидрогеохимических аномалий, возникающих вследствие подтока и перетока естественных подземных вод; б) гидрогеохимических аномалий, возникающих вследствие изменения геохимического режима; в) смешанных гидрогеохимических аномалий.

В первом случае главными геолого-гидрогеологическими условиями, определяющими основные характерные черты гидрогеохимических аномалий, являются: а) фильтрационные свойства пород посторонних и данного водоносного комплексов; б) химический состав подземных вод посторонних и данного водоносного комплекса; в) физико-химические процессы в системах "подземная вода — вмещающая (окружающая) среда" посторонних и данного водоносного комплексов.

От фильтрационных свойств пород зависит при стабильном режиме водоотбора интенсивность поступления в пределы эксплуатационного участка подземных вод иного состава. С наличием за пределами эксплуатационного участка минерализованных подземных вод связана возможность ухудшения качества эксплуатируемых вод.

Знание физико-химических процессов в системе "минерализованная подземная вода — вмещающая (окружающая) среда" в пределах эксплуатационного участка дает возможность прогнозировать характер физико-химических процессов в измененной подземной воде и в системах, образуемых этой водой с вмещающими и окружающими средами, а на основании характера процессов — степень и направленность преобразования суммарной минерализации и ионного состава измененных подземных вод во времени.

Перечисленные факторы формирования гидрогеохимических аномалий целесообразно систематизировать в группы, каждой из которых соответствуют аномалии различной количественной значимости и разного качества.

Породы по фильтрационным свойствам в самом общем виде делятся на три группы. В первую группу входят трещиноватые изверженные, метаморфические, карбонатные и крупнозернистые песчаные породы. Они характеризуются высокими значениями коэффициента фильтрации, что способствует усиленному подтягиванию в пределы эксплуатационного участка посторонних подземных вод. Вследствие того, что в указанных условиях регионально распространены, как правило, воды хорошего качества, то практически гидрогеохимические аномалии не формируются. Однако возможны случаи смешения с водами резко иного состава (например, с морскими в приморских районах); тогда состав вод в пределах

эксплуатируемого участка изменяется, что сопровождается выпадением из вод слаборастворимых соединений и коагуляцией породы. Вторая группа — песчаные среднезернистые породы со средними значениями коэффициентов фильтрации. В этом случае подземные воды на эксплуатационный участок поступают медленнее и в меньших объемах, но сами они вследствие более длительного времени протекания физико-химических процессов имеют повышенную суммарную минерализацию. Иногда она может превышать 1 г/л, поэтому создается угроза локального поступления в пределы эксплуатационного участка минерализованных подземных вод. Третья группа пород — мелкозернистые песчаные и слаботрециноватые карбонатно-сульфатные породы с малыми коэффициентами фильтрации. Они обуславливают перенос подземных вод в пределы эксплуатационного участка. Однако при условии значительного водоотбора поступление вод усиливается, воды поступают часто минерализованные. Учет данной систематизации дает возможность предусмотреть изменения качества подземных вод на эксплуатируемом участке. При детальной количественной оценке изменения качества подземных вод необходимы детальный учет особенностей водовмещающих пород и их более дробная систематизация.

Систематизация подземных вод по химическому составу в целях прогноза изменения качества вод при эксплуатации сводится к систематизации подземных вод по геолого-гидрогеологическим условиям формирования гидрогеохимических аномалий на участках эксплуатации. В значительной части случаев эксплуатации подземных вод сопровождается изменением их качества. В разных геолого-гидрогеологических условиях качество вод изменяется по разнообразным параметрам и в различной степени. Чаще всего изменение качества вод заключается в возрастании их суммарной минерализации (до 1,0 г/л и больше), в изменении ионного состава и в приобретении водами жесткости и агрессивности.

Исходя из сочетания пород различного литологического облика, скоростей фильтрации подземных вод, а также 113 структурно-тектонических условий, нами выделено семь типовых геолого-гидрогеологических обстановок с характерными особенностями в изменении химического состава подземных вод при их эксплуатации. Из них четыре обстановки обуславливают возможность появления в пределах эксплуатационного участка вод с суммарной минерализацией, превышающей 1,0 г/л. В условиях этих обстановок подземные воды часто становятся жесткими, с сульфатной агрессивностью. В других случаях, когда подземные воды при эксплуатации остаются пресными, они могут обладать углекислотной агрессивностью и другими неблагоприятными свойствами.

Основными физико-химическими процессами формирования подземных вод повышенной минерализации, поступающих в пределы эксплуатационного участка при водоотборе, являются: а) углекислотное гидролитическое выщелачивание; б) окисление и серноокислотное выщелачивание; в) растворение; г) концентрирование.

Углекислотному гидролитическому выщелачиванию подвергаются алюмосиликатные породы; система "подземная вода — алюмосиликаты — углекислый газ" неравновесна; при натриевом составе алюмосиликатов и малых скоростях фильтрации могут формироваться воды значительной (в несколько г/л) минерализации. В случае кальциевого состава алюмосиликатов воды жесткие. И натриевые и кальциевые воды при замене гидрокарбонат-иона на хлор содержат избыток свободной углекислоты и обладают углекислотной агрессивностью.

Окисление и серноокислотное выщелачивание развиваются в случае,

когда породы, обогащенные сульфидами металлов, представлены терригенными и карбонатными разностями. В этом случае образующаяся при окислении сульфидов металлов серная кислота выщелачивает карбонатные разности пород; формируются воды повышенной суммарной минерализации с сульфатной агрессивностью и жесткостью.

Процесс растворения является преобладающим в системе "подземная вода — сульфатная порода с примесью карбонатного материала". Он действует в этой системе одновременно с углекислотным выщелачиванием. Сочетание между этими процессами неодинаково в разных частях водоносных комплексов. Углекислотное выщелачивание карбонатных пород преобладает на водораздельных участках или в пределах положительных структур, т.е. в областях преимущественной инфильтрации. В направлении движения вод к областям разгрузки или погруженным структурам в системе начинает преобладать процесс растворения сульфатных пород. В водах гидрокарбонат-ион заменяется сульфат-ионом, они приобретают значительную суммарную минерализацию. Эти воды обладают сульфатной агрессивностью и жесткостью.

Основными геолого-гидрогеологическими показателями формирования гидрогеохимических аномалий, возникающих вследствие изменения геохимического режима, являются минералогический состав пород зоны аэрации и пород того или иного рассматриваемого водоносного комплекса и физико-химические процессы.

Минералогический состав пород должен обеспечивать протекание процессов окисления и серноокислотного выщелачивания, возникновение которых потенциально обуславливается вновь формирующейся в условиях водоотбора окислительной обстановкой. В группу такого рода пород входят терригенные песчано-глинистые континентального и морского генезиса, обогащенные сульфидными минералами породы, а также карбонатные породы. Первые обеспечивают протекание процесса окисления, сопровождающегося в случае полисульфидных минералов поступлением в воду металлов и серной кислоты. Карбонатные породы являются материалом для серноокислотного выщелачивания. Терригенные песчано-глинистые породы сами по себе разнообразны в минералогическом отношении. Они могут быть силикатными, алюмосиликатными. Среди последних возможно преобладание кальциевых или натриевых алюмосиликатов. В каждом случае формируются подземные воды своеобразного химического состава: гидрокарбонатные, кремнистые, кальциевые, натриевые или с различным соотношением перечисленных компонентов. Сочетание этих компонентов с компонентами, являющимися результатом окисления и серноокислотного выщелачивания, обуславливает довольно сложный состав подземных вод на эксплуатационных участках. В связи с этим необходимо при установлении характера гидрогеохимических аномалий, возникающих вследствие изменения геохимического режима, более подробно изучать минералогический состав пород.

Изучение смешанных гидрогеохимических аномалий требует внимательного рассматривания возможности поступления загрязнений в подземные воды эксплуатационных участков. При этом исследуются фильтрационные свойства пород, химический состав подземных вод, физико-химические процессы в условиях естественного режима. Эти природные факторы являются основой типизации условий миграции компонентов-загрязнителей. Выделяются четыре группы геолого-гидрогеологических условий с характерной направленностью в изменении химического состава загрязненных подземных вод и в приобретении ими свойств, отрицательно сказывающихся на использовании их для питьевого и технического

водоснабжения. Наиболее благоприятными условиями (первая группа условий), тормозящими миграцию загрязняющих компонентов, являются условия водоносных комплексов в пределах платформенных структур, сложенных глинистыми разностями пород и характеризующихся гидрокарбонатным и гидрокарбонатно-хлоридным составом подземных вод. В случаях загрязнения названными выше стоками происходит сорбция загрязняющих компонентов и слабый их перенос. Как правило, в этих условиях загрязнение подземных вод слабое; содержание загрязняющих компонентов в водах ниже допустимых норм.

Во вторую группу входят подземные воды с геолого-гидрогеологическими условиями, соответствующими горно-складчатым областям и кристаллическим массивам с преимущественным распространением сильнотрещиноватых пород, включающих очень слабоминерализованные гидрокарбонатные или с небольшими концентрациями хлора воды. При загрязнении этих подземных вод рассматриваемыми стоками происходят смешение, очень слабая сорбция, массоперенос на значительные расстояния. В результате смешения подземных вод с загрязняющими компонентами воды во многих случаях за счет увеличения содержания кальция становятся жесткими.

К третьей группе относятся подземные воды с различными скоростями фильтрации, распространенные на платформах в пределах терригенных силикатных и алюмосиликатных пород. В этих условиях осуществляется смешение с гидрокарбонатными, гидрокарбонатно-хлоридными подземными водами загрязняющих компонентов, сорбция породами загрязняющих компонентов, распространение загрязняющих компонентов в пространстве. Под влиянием загрязняющих компонентов в водах возрастает содержание кальция и сульфат-иона, воды приобретают жесткость и в ряде случаев сульфатную агрессивность. Формированию сульфатной агрессивности способствуют малые скорости фильтрации подземных вод, определяющие накопление загрязняющих компонентов в подземных водах.

К четвертой группе относятся подземные воды платформенных областей, приуроченные к терригенным и терригенно-карбонатным с сульфидами металлов породам, а также к карбонатно-сульфатным породам; воды обладают высокими и средними скоростями фильтрации. Незагрязненные воды характеризуются гидрокарбонатным и гидрокарбонатно-сульфатным составом и в ряде случаев повышенной суммарной минерализацией. При смешении с ними стоков с относительно высокими концентрациями сульфат-иона и кальция эти ионы, как одноименные с ионами подземных вод, равновесных с породами, практически не сорбируются породами. Увеличение их концентрации в подземных водах вызывает осаждение из вод сульфата кальция. Оставшиеся концентрации этих ионов во многих случаях достаточны, чтобы подземные воды сохранили жесткость и сульфатную агрессивность.

В целом миграция компонентов-загрязнителей вследствие разнообразия их свойств и свойств природных сред во многих случаях чрезвычайно сложна и в настоящее время недостаточно изучена. Поэтому типизация природных факторов формирования аномалий смешанного типа является схематичной. При выявлении аномалий смешанного типа необходимо учитывать возможности проникновения загрязнений в пределы эксплуатационного участка, главным образом с поверхности земли. Этот подход позволяет классифицировать природные факторы относительно миграции компонентов-загрязнителей в подземные воды эксплуатационного участка. В этом варианте типизации рассматриваются: а) фильтрационные свойства пород в пределах от поверхности земли до уровня отбора воды отдельно для

зоны аэрации и обводненной зоны; б) глубины залегания водоносных комплексов и гидравлические связи между ними. В общем виде известно, что загрязнения легко поступают в подземные воды в карстовых районах, в районах распространения в верхней части земной коры трещиноватых пород и грубозернистых отложений (аллювиальных и др.). Затруднено поступление компонентов-загрязнителей в подземные воды в районах, сложенных глинистыми разностями пород.

Более легко компоненты-загрязнители попадают в неглубоко залегающие подземные воды, слабее — в глубоко залегающие; в случае трещиноватых пород компоненты-загрязнители и при больших глубинах быстро достигают подземных вод.

Типизация природных факторов по условиям миграции компонентов-загрязнителей, помимо перечисленного, должна включать градиент изменения суммарной минерализации, выраженной через г/л на 100 м. Высокий градиент суммарной минерализации способствует проникновению компонентов-загрязнителей в пределы эксплуатационного участка.

Большое значение для прогноза миграции посторонних подземных вод и компонентов-загрязнителей в пределы эксплуатационного участка имеет гидродинамическая модель участка, составление которой возможно на аналоговых машинах.

При районировании в целях прогноза изменения качества вод территории распространения отдельного водоносного комплекса единицами районирования являются гидрогеохимические провинции и области. Гидрогеохимические провинции выделяются по типу гидрогеохимических аномалий. Каждой провинции соответствует конкретный тип гидрогеохимической аномалии.

Гидрогеохимические области в пределах провинций выделяются по особенностям химического состава подземных вод, принадлежащих к аномалиям данного типа; они могут быть представлены суммарной минерализацией, макроанионами, катионами, микрокомпонентами, органическими веществами, величинами pH, ϵ_h . Главное внимание обращается на гидрогеохимические показатели, отрицательно влияющие на качество эксплуатируемых подземных вод и предусмотренные ГОСТом. К ним наряду с суммарной минерализацией и другими перечисленными выше показателями относятся жесткость, агрессивность, физические свойства.

В основу выделения областей закладываются типы геолого-гидрогеологических условий формирования аномалий. В каждом отдельном случае районирования на основе изложенного выше выделяются конкретные типы геолого-гидрогеологических условий и каждому из них соответствуют аномалии с определенными гидрогеологическими характеристиками.

При районировании территории распространения в вертикальном разрезе серии водоносных комплексов единицами районирования являются гидрогеохимические районы и подрайоны.

Гидрогеохимические районы — участки территории, в пределах которых вертикальный разрез на основании характера гидрогеохимических аномалий делится на то или иное число гидрогеохимических этажей, т.е. каждому району соответствует свой вид вертикального гидрогеохимического разреза, сформированного под влиянием эксплуатации подземных вод для водоснабжения. Карта гидрогеохимического районирования серии водоносных комплексов составляется на основании карт отдельных водоносных комплексов, слагающих данный вертикальный разрез, посредством их наложения. При наложении проводится аналогия распространения в пределах водоносных комплексов гидрогеохимических провинций и областей.

Прогноз изменения состава эксплуатируемых подземных вод, прово-

димый с помощью гидрогеохимического районирования, — качественно-количественный. Количественно оцениваются суммарная минерализация вод, микрокомпоненты, жесткость, агрессивность и другие гострируемые гидрогеохимические характеристики. Количественная оценка этих характеристик проводится по двум категориям: а) на период исследований; б) на более поздний период. В первом случае оценка производится путем фиксации величин суммарной минерализации и других характеристик подземной воды путем их лабораторного анализа, во втором — посредством расчетного определения изменения концентрации гострируемых компонентов в ходе их миграции.

Глава 4

Гидрогеохимические аспекты утилизации промстоков путем их подземного захоронения

4.1. Геолого-гидрогеологические условия подземного захоронения промстоков

Подземное захоронение промстоков имеет большое значение, так как способствует их изоляции от сферы деятельности человека. Изоляции путем подземного захоронения подлежат, как правило, биологически вредные промстоки.

Подземное захоронение можно использовать для жидких и твердых промышленных отходов. Для складирования твердых отходов используют отработанные шахты и другие подземные выработки, а также естественные подземные емкости (карстовые полости и др.). Но наиболее развито подземное захоронение жидких промышленных отходов, так как они шире распространены и имеют большие объемы по сравнению с твердыми отходами. Вследствие этого в настоящем разделе рассматриваются вопросы подземного захоронения, главным образом применительно к жидким отходам. Значительные объемы жидких отходов дают промышленность, коммунальные хозяйства и сельскохозяйственное освоение территорий.

Объемы промстоков вследствие увеличения числа очистных сооружений с каждым годом сокращаются. Ежегодно в строй вводится большое число очистных сооружений с разными видами очистки: механической (промстоки отстаиваются в специально подготовленных емкостях или естественных резервуарах), химической (из промстоков наиболее вредные компоненты или осаждаются в виде нерастворимых соединений, или поглощаются ионитами), биологической. В последнее время широкие масштабы приобретает оборотное производственное водоснабжение с использованием промышленных предприятий. И тем не менее часть промстоков вследствие главным образом технологической недостаточности их очистки требует решения вопроса об их изоляции.

Подземным захоронением промстоков в настоящее время пользуются во многих странах мира, особенно в экономически развитых. В США, например, захороняются в недра земли стоки предприятий химической, фармацевтической, нефтеперерабатывающей и металлургической промышленности.

В связи с подземным захоронением промстоков возникают разнообразные и сложные задачи. Одна из них — поиски естественных емкостей

для захоронения промстоков. Другую группу составляют задачи по обоснованию изменения во времени и в пространстве приемистости промстоков водоносными комплексами. Третья группа задач относится к обоснованию продвижения промстоков по водоносному пласту. В четвертую группу входят задачи прогнозного районирования по условиям подземного захоронения промстоков. Возникает ряд других, более мелких задач, направленных на решение многих детальных вопросов проблемы подземного захоронения промстоков.

Решение перечисленных задач возможно при строгом соблюдении общих правил подземного захоронения, главные из которых следующие: а) захоронению подлежат наиболее биологически вредные стоки, которые практически не поддаются очистке по технологическим причинам, или промстоки, очистка которых невыгодна с экономических позиций; б) захороняются относительно незначительные объемы промстоков.

Подземное захоронение промстоков должно удовлетворять условиям, обеспечивающим геолого-гидрогеологическую и экономическую целесообразность этого мероприятия.

Геолого-гидрогеологическая целесообразность подземного захоронения промстоков складывается из емкостных свойств водоносного комплекса, предназначенного для подземного захоронения, и из практической значимости содержащихся в водоносном комплексе подземных вод (они не должны представлять собой полезное ископаемое, которое можно в тот или иной период времени использовать для водоснабжения, в качестве минерального сырья, лечебных вод и др.).

Очень серьезными условиями подземного захоронения промстоков являются геолого-гидрогеологические показатели их миграции. В качестве благоприятных показателей рассматриваются обстановки, обуславливающие слабое распространение промстоков в водоносном комплексе. С этих позиций при подземном захоронении промстоков особенно должны соблюдаться два правила: 1) данный водоносный комплекс должен быть надежно изолирован от соседних водоносных комплексов и более всего от водоносных комплексов с водой хозяйственного значения; 2) породы данного водоносного комплекса должны обладать незначительными коэффициентами фильтрации.

Экономическая целесообразность подземного захоронения промстоков предусматривает минимальные затраты при данном варианте изоляции промстоков. Она складывается из соотношения затрат на утилизацию промстоков путем подземного захоронения и утилизацию посредством очистки, из степени освоения территории (подъездные пути и др.), из условий залегания водоносного комплекса, предназначенного для подземного захоронения промстоков (глубины, мощность и др.).

Подземное захоронение промстоков осуществляется различными способами. В пределах земной коры оно может производиться в зону аэрации и в водонасыщенную часть земной коры (рис. 20).

Различают три вида участков, благоприятных для сброса промстоков в зону аэрации: первый — естественные полости, образованные кавернозными или сильнотрещиноватыми породами; второй — искусственные полости, представленные разнообразными выработками (шахтами, подземными карьерами и т.д.); третий — специально создаваемые полости (рис. 20).

При захоронении в естественные и искусственные полости зоны аэрации иногда предусматривается отверждение промстоков. В последнее время этому способу захоронения уделяется пристальное внимание. Для такого способа захоронения часто используются отработанные соляные шахты



Рис. 20. Схема способов подземного захоронения промстоков

(например, в США, ФРГ, ГДР). В ряде случаев отверждение применяется для утилизации радиоактивных отходов.

Складирование промстоков в зону аэрации осуществляется при атмосферном давлении. В пределах водонасыщенной части земной коры промстоки или сбрасываются в водоносные комплексы и горизонты, или закачиваются в них под давлением. Чаще всего промстоки закачиваются, так как даже в случае использования для их захоронения безнапорного грунтового водоносного комплекса требуется вытеснение части подземной воды. За заполнением участка захоронения промстоками следят по анализам подземной воды, отбираемой из наблюдательных скважин. Появление признаков загрязнения подземной воды промстоками в наиболее удаленных наблюдательных скважинах указывает на заполнение выбранного участка водоносного комплекса промстоками и на прекращение их закачки.

Захоронение промстоков в грунтовой и неглубокие пластовые водоносные комплексы, как правило, осуществляется при давлениях и температурах, близких к атмосферным, но в зависимости от технологии производства могут захороняться и горячие промстоки.

При использовании глубоких водоносных комплексов для захоронения промстоков последние могут закачиваться в пределы участков развития нефтяных и газовых залежей (рис. 20). Захоронять промстоки в пределы таких участков возможно при условии полного или частичного извлечения из них нефти и газа. В первом случае промстоки нагнетаются в отработанные по нефти и газу участки водоносных комплексов, во втором — в водоносные комплексы для поддержания пластового давления, необходимого для извлечения нефти и газа.

В настоящее время для подземного захоронения промстоков наиболее широко используются глубокие водоносные комплексы.

Рассмотренные выше технологические схемы подземного захоронения промстоков обычно применяются в конкретных геолого-гидрогеологических условиях.

Подземное захоронение промстоков в зону аэрации наиболее приемлемо для горно-складчатых областей и кристаллических массивов платформенного типа. Эти районы характеризуются распространением преимущественно пресных подземных вод, залегающих на незначительных глубинах и

образующих главным образом грунтовые водоносные комплексы. Хорошее качество подземных вод этих районов обуславливает нежелательность захоронения промстоков в водонасыщенную зону и определяет поиск, возможности захоронения промстоков в зону аэрации. Благоприятными моментами захоронения промстоков в зону аэрации в горно-складчатых областях и кристаллических массивах являются: а) широкое распространение блоковых структур, характеризующихся наличием пород с различной степенью трещиноватости; это обуславливает существование относительно изолированных участков пород с высокими емкостными свойствами, которые можно использовать для захоронения промстоков; б) широкое развитие участков с относительно большой мощностью зоны аэрации.

Специальное создание для захоронения промстоков искусственных емкостей в зоне аэрации целесообразно в районах, где кристаллические породы характеризуются незначительной трещиноватостью.

Для подземного захоронения промстоков в грунтовые и неглубокие пластовые водоносные комплексы наиболее благоприятными являются районы, характеризующиеся фильтрационной неоднородностью водовмещающих пород и вместе с тем наличием относительно изолированных участков пород с повышенными емкостными свойствами. В геолого-гидрогеологическом отношении это районы, приуроченные к платформам и сложенные главным образом терригенными, а также карбонатными породами.

Захоронение промстоков в глубокие водоносные комплексы приурочено к платформенным областям, к предгорным прогибам и межгорным впадинам. Водоносные комплексы, используемые для подземного захоронения промстоков, в этих районах залегают на глубинах до 3500—4000 м; целесообразнее использовать водоносные комплексы с глубинами залегания до 2000 м, так как это экономичнее. Пластовые давления и температуры в пределах участков захоронения могут колебаться в значительных пределах. Породы, слагающие водоносные комплексы, предназначенные для подземного захоронения промстоков, представлены преимущественно трещиноватыми терригенными и карбонатными породами. Возможность использования для подземного захоронения промстоков глубоко залегающих водоносных комплексов объясняется в случае сложения терригенными породами их незначительной сжимаемостью, а при сложении карбонатными породами — формированием на больших глубинах трещиноватости путем выщелачивания подземными водами.

При этом сложные пути миграции подземных вод в карбонатных отложениях определяют формирование емкостной их неоднородности. Поэтому при поисках пластов-коллекторов среди водоносных комплексов, сложенных карбонатными породами, в целях выделения пластов с максимальными емкостными свойствами необходимо детальное исследование их фильтрационной неоднородности в плане и разрезе.

Оценка гидродинамической изоляции водоносных комплексов, предназначенных для подземного захоронения промстоков, проводится как в случае наличия водоупорных пород в кровле и подошве водоносного комплекса, так и при отсутствии перекрывающих и подстилающих водоупорных пород.

К хорошо изолирующим относятся галогенные породы. Глинистые же и сульфатные породы, часто рассматриваемые в литературе в качестве непроницаемых, в той или иной степени фильтруют воду, и в ряде случаев через них осуществляется гидравлическая связь пласта-коллектора с перекрывающими или подстилающими водоносными комплексами. В связи с этим при наличии в кровле и подошве водоносного комплекса, предназна-

Таблица 22
Примеры химического состава подземных вод
водоносных комплексов артезианских бассейнов

Формула химического состава воды	Σ_M , г/л	Ионы, мг-экв/л		
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Водоносные комплексы краевых частей артезианских бассейнов				
HCO ₃ ClNa	1,3—9,8	6,0—46,8	1,7—2,8	10,4—79,3
ClHCO ₃ Na	3,3—4,9	26,0—51,0	0,6—2,9	13,7—21,0
Cln.HCO ₃ Na	6,2—12,6	80,0—181,5	0—8,2	12,0—23,2
Cln.HCO ₃ Nan,Ca	2,6—39,3	27,0—609,9	3,3—4,0	10,0—55,1
Водоносные комплексы погруженных частей артезианских бассейнов				
Мезо-кайнозойских				
ClNa	18,0—91,1	286,0—1549,9	0,1—27,6	1,2—15,0
ClNan,Ca	20,4—129,0	337,0—2224,3	0,48—19,6	2,1—25,0
ClNaCa	102,8—134,8	1796,8—2311,6	0,8—6,5	4,3—6,9
Палеозойских				
ClNa	24,0—332,0	420—4700	2—120	0,3—16
ClNan,Ca	122,0—312,0	1900—4700	6—80	1—1,6
ClNaCa	167,0—525,0	2600—4600	1,4—6	1,3—10
ClCaNa	318,0	4800	2	1,5
ClNaCan,Mg	324,0	4500	4	1,6
ClCaNan,Mg	318,0—349,0	4700—5100	0,2—2	1,6—3

чаемого для подземного захоронения промстоков, глинистых или сульфатных пород необходимо исследовать степень их проницаемости.

В случае отсутствия в кровле и подошве пласта-коллектора водоупорных пород распространение за их пределы подземных вод, загрязненных промстоками, определяется региональными гидродинамическими условиями.

Региональные гидродинамические условия артезианских бассейнов характеризуются преобладанием движения подземных вод в пределах каждого отдельного водоносного комплекса в направлении его погружения и частичным перетеканием подземных вод из одних водоносных комплексов в другие. Таким образом, характер региональной гидродинамической обстановки в случае, когда водоносные комплексы не разделяются водоупорами, уже сам по себе определяет относительную изолированность каждого отдельного комплекса.

Перетекание подземных вод из одних комплексов в другие происходит наиболее ощутимо по дизъюнктивным нарушениям. При значительной амплитуде нарушений подземные воды из водоносного комплекса, предназначенного для захоронения промстоков, могут поступать сразу в несколько соседних водоносных комплексов.

Подземные воды различных водоносных комплексов, предназначенных для подземного захоронения промстоков, значительно отличаются по химическому составу.

	Ионы, мг-экв/л			
	CO ₃ ²⁻	Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Водоносные комплексы краевых частей артезианских бассейнов				
0—9,7	15,3—110,9	1,5—5,4	1,3—22,4	
0—3,1	47,6—73,2	1,2	0,5—0,8	
0—2,5	97,5—202,5	0,85—4,0	0,3—1,31	
0,0	33,3—478,3	5,0—102,8	2,0—87,97	
Водоносные комплексы погруженных частей артезианских бассейнов				
Мезо-кайнозойских				
0—4,8	365,0—1422,1	15,5—149,7	0,89—78,13	
0,0	316,7—1795,7	35,54—382,97	8,58—79,88	
0,0	1148,1—1784,9	439,5—573,4	34,2—82,3	
Палеозойских				
0,0	340—4300	5—1950	0,5—700	
0,0	1800—3600	150—1000	240—750	
0,0	1260—2600	1000—1800	330—830	
0,0	1700	2200	800	
0,0	1900	1950	1600	
0,0	1300—1600	2100—2950	1000—1100	

Химический состав подземных вод грунтового и пластовых водоносных комплексов зоны активного водообмена в районах с различными климатолого-геоморфологическими и литологическими обстановками разнообразен. В общем виде, с учетом простейших, но широко распространенных в природе случаев разнообразия, это воды пяти геохимических групп. В первую группу входят подземные воды гидрокарбонатного кальциево-магниевого (или магниево-кальциевого) состава с суммарной минерализацией менее 1 г/л (чаще несколько десятков — первые сотни мг/л), приуроченные к четвертичным, а также к коренным терригенно-карбонатным отложениям. Они формируются посредством углекислотного выщелачивания алюмосиликатных песчано-глинистых отложений, известняков, доломитов и других карбонатных разностей.

Вторую группу составляют гидрокарбонатные натриевые воды с суммарной минерализацией от нескольких десятков до сотен мг/л. Они формируются посредством углекислотного выщелачивания кристаллических пород и терригенных алюмосиликатных отложений с преобладанием натриевых минералов.

Третью группу представляют гидрокарбонатно-хлоридные натриевые воды с суммарной минерализацией в несколько сотен мг/л. Соотношение между гидрокарбонат-ионом и хлором в этих водах непостоянно. Они приурочены или к изверженным и метаморфическим породам, обогащенным слюдами и другими минералами, содержащими хлор, или к четвертич-

ным и коренным отложениям морского генезиса, обогащенным ионно-солевым комплексом.

Четвертая группа — воды гидрокарбонатно-сульфатного кальциево-магниевого состава с суммарной минерализацией в несколько сотен мг/л. Воды приурочены к песчано-глинистым породам, обогащенным сульфидами металлов. Процессы, протекающие между водой и отложениями, — гидролитическое углекислотное выщелачивание алюмосиликатов и окисление сульфидных минералов.

В пятую группу входят подземные воды сульфатно-гидрокарбонатного кальциевого, сульфатного кальциевого и сульфатного натриевого состава с суммарной минерализацией более 1,0 г/л, формирующиеся в районах развития сульфатных отложений посредством их растворения.

Подземные воды пластовых водоносных комплексов краевых частей артезианских бассейнов характеризуются суммарной минерализацией, в целом не превышающей 35 г/л. Нижний предел суммарной минерализации этих вод 3—5 г/л.

Главные анионы этих вод — гидрокарбонат- и хлор-ионы (в изменяющихся соотношениях), главный катион — натрий (табл. 22).

Для подземных вод напорных водоносных комплексов погруженных частей артезианских бассейнов характерны большой диапазон суммарной минерализации (от 25—35 до 300 г/л и более) и преимущественно хлоридный, натриевый, хлоридный натриево-кальциевый (или кальциево-натриевый) состав (см. табл. 22).

При относительном постоянстве ионного состава суммарная минерализация вод различных в стратиграфическом отношении водоносных комплексов погруженных частей артезианских бассейнов существенно неодинакова. В самом общем виде можно выделить две группы водоносных комплексов: а) в мезо-кайнозойских и б) в палеозойских отложениях. Суммарная минерализация подземных вод водоносных комплексов, приуроченных к мезо-кайнозойским отложениям, ниже (от первых десятков до 100 г/л, редко более) по сравнению с подземными водами водоносных комплексов палеозойских отложений (от 70—80 до 250—300 г/л и более).

Различия в суммарной минерализации рассматриваемых подземных вод — результат неоднозначной длительности их формирования. Подземные воды водоносных комплексов палеозойских отложений характеризуются более длительным формированием, а следовательно, более продолжительным временем протекания физико-химических процессов, приводящих к значительной концентрации в этих водах компонентов минерализации.

Независимо от стратиграфической принадлежности в подземных водах каждого отдельного водоносного комплекса глубоких частей артезианских бассейнов с увеличением суммарной минерализации изменяется соотношение между катионами: возрастает содержание кальция (иногда и магния) относительно содержания натрия. В результате воды каждого отдельного водоносного комплекса по изменению соотношения между натрием и кальцием образуют ряд



Изменения концентрации макрокомпонентов в подземных водах приведенного ряда иллюстрируются среднеарифметическими значениями и квадратичными отклонениями (табл. 23).

Соотношение в рассматриваемых подземных водах между главными компонентами и суммарной минерализацией, а также между компонентами выражено высокими значениями коэффициентов корреляции (табл. 24). Соотношение второстепенных компонентов с суммарной минерализацией

Таблица 23

Пример среднеарифметических значений
и квадратичных отклонений компонентов подземных вод
различного химического состава погруженных частей артезианских бассейнов

Компо- ненты	ClNa		ClNa _n .Ca	ClNaCa		ClCaNa
	I	II	I	I	II	I
Σ_M	7267,0	7613,1	6903,60	7419,4	7978,2	7928,0
	535,86	431,7	692,67	435,12	418,87	450,0
Cl	3062,6	3789,96	3436,0	3685,0	3985,1	3960,12
	265,9	204,97	349,3	250,93	210,33	225,27
SO ₄	28,84	15,4	16,24	4,02	3,37	3,29
	8,34	8,27	6,41	5,28	2,52	1,46
HCO ₃ + + CO ₃	2,23	5,8	0,16	1,84	0,55	0,27
	3,21	11,1	0,44	3,59	0,87	0,49
Ca	263,06	3020,12	502,80	885,69	1651,6	2045,2
	81,9	50,31	60,83	134,56	193,16	161,9
Mg	111,5	113,13	167,77	261,16	257,43	222,45
	46,5	39,64	41,41	45,07	52,51	65,16
Na + K	3259	3391,0	2781,30	2543,61	2079,75	1682,25
	328,6	243,8	341,63	181,96	166,78	186,35

Примечание. В таблице верхняя величина — среднеарифметическое значение, нижняя — квадратичное отклонение. I, II — районы.

Таблица 24

Пример коэффициентов множественной корреляции (R),
компонентов подземных вод артезианских бассейнов

Водоносный комплекс А	Ионы	Na					
	K	0,299 (+)	K				
	Ca	0,395 (+)	0	Ca			
	Mg	0,644 (+)	0,129 (+)	0,654 (+)	Mg		
	Cl	0,890 (+)	0,292 (+)	0,657 (+)	0,800 (+)	Cl	
	SO ₄	0,378 (+)	0,189 (+)	0,461 (-)	0	0,053 (+)	SO ₄
	HCO ₃	0,394 (-)	0,095 (-)	0,446 (-)	0,440 (-)	0,460 (2)	0
Водоносный комплекс Б	Ионы	Na					
	K	0,150 (+)	K				
	Ca	0,350 (+)	0,293 (+)	Ca			
	Mg	0,450 (+)	0,209 (+)	0,701 (+)	Mg		
	Cl	0,810 (+)	0,370 (+)	0,740 (+)	0,730 (+)	Cl	
	SO ₄	0,050 (+)	0	0,412 (-)	0	0	SO ₄
	HCO ₃	0,390 (-)	0,210 (-)	0,296 (-)	0,310 (-)	0,450 (-)	0

и с главными компонентами выражено низкими значениями коэффициентов корреляции.

Как следует из табл. 24, хлор в подземных водах погруженных частей артезианских бассейнов наиболее тесно связан с натрием, кальцием, магнием, а также со всеми макрокомпонентами вместе; у хлора слабая корреляционная связь с сульфат-ионом и гидрокарбонат-ионом. Сульфат-ион слабо связан со всеми макрокомпонентами, а для гидрокарбонат-иона характерна обратная связь со всеми макрокомпонентами.

Натрий тесно связан с хлором, магнием и всеми макрокомпонентами вместе; слаба связь у натрия с калием, кальцием, сульфат-ионом, гидрокарбонат-ионом.

Кальций, подобно натрию, хорошо коррелируется с хлором и магнием, а также со всеми компонентами вместе; с сульфат-ионом и гидрокарбонат-ионом имеет обратную связь.

Магний имеет тесную корреляционную связь с хлором и кальцием и со всеми компонентами вместе.

Изложенное выше свидетельствует о том, что подземные воды водоносных комплексов артезианских бассейнов, предназначенных для подземного захоронения промстоков, являются сложными в гидрогеохимическом отношении; суммарная минерализация и ионный состав вод непостоянны по простиранию водоносных комплексов. Эти обстоятельства указывают на необходимость тщательного изучения гидрогеохимических условий участков водоносных комплексов, которые планируются под подземное захоронение промстоков.

4.2. Формирование гидрогеохимических условий под влиянием подземного захоронения промстоков

4.2.1. Характеристика состава промстоков

Подземному захоронению подвергаются чаще всего промстоки нефте- и газоперерабатывающих предприятий содовых и содово-цементных заводов, предприятий по переработке калийных и других солей, а также стоки химических, фармакологических и других производств.

Промстоки нефтеперерабатывающих предприятий разнообразны по суммарной минерализации и ионному составу. Их общей особенностью является присутствие значительных количеств нефти, однако для подземного захоронения промстоки, как правило, очищаются от нефти.

Суммарная минерализация промстоков нефтеперерабатывающих предприятий изменяется от десятых долей до 50 г/л и более. Ионный состав представлен всеми основными анионами и катионами, но в определенных сочетаниях: гидрокарбонат-иона с сульфат-ионом (стоки $\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{Na}$ состава), гидрокарбонат-иона с хлор-ионом и сульфат-ионом (стоки $\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{ClCaNaMg}$ состава), сульфат-иона с хлор-ионом (стоки $\text{SO}_4\text{ClCaMgNa}$ и SO_4ClNa состава), хлор-иона с гидрокарбонат-ионом (стоки $\text{Cln.HCO}_3\text{NaMgCa}$ состава) (табл. 25) и др.

Промстоки газоперерабатывающих заводов содержат в различных количествах и соотношениях неорганические соединения, а также нефтепродукты, триэтанолламин, полиэтиленгликоль, эмульгаторы. Суммарная концентрация неорганических соединений в промстоках различных стадий переработки сырья неодинакова и колеблется от первых десятков до почти 100 г/л. В компонентном составе стоков наиболее существенны сульфат-ион, хлор, натрий, калий, кальций (табл. 26).

Таблица 25

Пример состава промстоков нефтеперерабатывающих предприятий

Формула химического состава	Σ_M	Cl	SO ₄	HCO ₃	Na + K	Mg	Ca	pH
HCO ₃ SO ₄ Na	3,3	122,5	748,8	1671,4	719,74		37,56	
		3,5	15,6	27,4	44,5	0,0	1,44	10
HCO ₃ SO ₄ Cl •	0,47	56,0	96,0	183,0	52,20	7,68	75,12	
• Ca Na n.Mg		1,6	2,0	3,0	2,82	0,64	3,13	9
SO ₄ ClCaMgNa	0,3	64,5	152,2		23,7	11,9	59,7	
		1,8	3,2	He обн.	1,0	0,9	3,0	10,0
Cln.HCO ₃ Nan.Ca	2,4	1241,1	82,3	317,2	789,1	29,2	104,2	
		35,0	1,7	5,2	34,3	2,4	5,2	8,1
SO ₄ ClNa	5,6	1136,1	2608,0	He обн.	1762,3	47,3	116,8	
		32,04	54,3		76,62	3,89	5,83	3,7

Примечание. В таблице верхняя величина — в мг/л, нижняя — в мг-экв/л.

Таблица 26

Пример состава промстоков газоперерабатывающих заводов по материалам А.Я. Гаева [1978]

Формула химического состава	Σ_M , г/л	Основные компоненты, г/л				
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
SO ₄ Nan.K	92,4	26,304	5,021	0,00	0,00	61,075
SO ₄ ClKNa	44,8	4,623	13,605	1,221	11,363	13,958
SO ₄ ClK	4,5	0,0	2,105	0,0	0,638	1,727
SO ₄ ClKNa	46,1	5,262	13,352	1,185	11,028	15,347
Cln.SO ₄ KCaNa	48,1	5,262	13,352	6,040	20,945	2,525
Cln.SO ₄ KNa	43,5	5,262	13,352	1,940	20,945	1,970
ClNa	36,9	14,165	0,0	0,864	21,863	0,0

В обобщенном виде промстоки газоперерабатывающих заводов на примере одного из газоконденсатных месторождений имеют сульфатно-хлоридный натриево-калиевый SO₄ClNaK состав с суммарной минерализацией около 40 г/л. Содержание основных компонентов (г/л): Na⁺ — 9,4; K⁺ — 6,3; Ca²⁺ — 0,1; Cl⁻ — 6,1; SO₄²⁻ — 17,7.

Промстоки содовых и содово-цементных заводов практически нацело минеральные, не содержат органических примесей и сильно токсичных компонентов. Они характеризуются высокой суммарной минерализацией (100 г/л и более) и значительным содержанием хлора, кальция, натрия. Основным отходом этих производств является дистиллерная жидкость. В весовых процентах ее состав следующий: CaCl₂ — 7,60; NaCl — 6,33; Ca(OH)₂ — 1,27; CaCO₃ — 1,33; Mg(OH)₂ — 0,06; NH₄OH — 0,01; R₂O₃ — 0,29; нерастворимых в HCl веществ — 0,05 (табл. 27).

Промстоки, образующиеся при переработке разного рода солей, имеют различный состав и суммарную минерализацию. Общая их отличительная

Таблица 27
Состав дистиллерной жидкости

Σ_M , г/л	Cl	SO ₄	HCO ₃	CO ₃	Na + K	Mg	Ca	Формула химического состава pH
162	9999,7	668,0	1415,2	Не обн.	23165,0	Не обн.	37074,0	ClCaNa
	2820,0	13,96	23,2		1007,2		1850,0	11,3
	49,3	0,25	0,45		17,6		32,4	

Примечание. В таблице верхняя величина — в мг/л, средняя — в мг-экв/л, нижняя — в экв.%.

Таблица 28
Пример компонентного состава (в пределах колебания)
слабоминерализованных стоков химико-фармацевтического завода

Формула состава	Σ_M , г/л	pH	мг/л					
			Cl	SO ₄	HCO ₃ + CO ₃	Na + K	Mg	Ca
SO ₄ Na	8,0—8,6	7,5—7,3	35—200	5000—5,300	360—390	2,300—2,600	16—24	150—164

особенность — высокое содержание минеральных соединений, высокая суммарная минерализация, незначительные примеси органических соединений, наличие взвесей.

Особенно высоко минерализованы стоки, образующиеся при производстве калийных солей. Эти стоки содержат большое количество (до 50%) нерастворимых веществ, значительное количество (8—15%) щелока. Состав минеральных солей представлен в основном хлористым натрием.

Промстоки химической и фармацевтической отраслей промышленности содержат, помимо минеральных отходов, значительные количества (до 60% и более) органических веществ и микрокомпонентов.

По общей сумме веществ стоки химической и фармацевтической отраслей промышленности делятся на слабоминерализованные и сильноминерализованные. Судя по неорганической части, слабоминерализованные стоки имеют сульфатный натриевый состав; их суммарная минерализация превышает 8,0 г/л (табл. 28). Сильноминерализованные стоки различных производств химико-фармацевтических заводов характеризуются высоким содержанием сульфат-иона и суммарной минерализацией, превышающей 150 г/л. Эти стоки содержат до 160—180 г/л органических соединений. В значительных количествах в них присутствуют фурфурол, уксусная кислота, ацетат, бисульфат натрия, хлористый аммоний, щелочь и др.

В общем виде с учетом большей части отраслей промышленности выделяется пять групп промстоков, которые наиболее часто могут подлежать подземному захоронению. Первую группу составляют промстоки, характеризующиеся малой минерализацией (преимущественно до 5 г/л) и смешанным анионно-катионным составом (HCO₃, Cl, SO₄, Ca, Mg, Na).

Во вторую группу входят промстоки хлоридно-сульфатно-натриевого (ClSO_4Na) состава с суммарной минерализацией 5—55 г/л.

Третья группа — промстоки сульфатно-хлоридного натриевого (SO_4ClNa) состава с суммарной минерализацией 5—95 г/л.

Четвертая группа — промстоки хлоридного кальциево-натриевого (ClCaNa) состава с суммарной минерализацией около 160 г/л.

В пятую группу входят промстоки преимущественно хлоридного натриевого (ClNa) состава с суммарной минерализацией более 150 г/л.

4.2.2. Миграционные системы при подземном захоронении промстоков и их пространственное положение

При подземном захоронении промстоков формируются различные по характеру и геохимическим свойствам миграционные системы. При захоронении промстоков в зону аэрации формируются миграционные системы "промсток—порода" и "промсток — порода — газ". Газы преимущественно атмосферного происхождения (углекислый газ и кислород). Углекислый газ имеет также биогеохимическую природу; в горно-складчатых областях он может быть глубинного происхождения. Участие в физико-химических процессах углекислого газа или кислорода либо обоих одновременно обуславливается составом промстоков и литолого-геохимическими особенностями отложений зоны аэрации.

При захоронении промстоков в напорные водоносные комплексы артезианских бассейнов формируются более сложные миграционные системы.

Это обуславливается, с одной стороны, технологическими особенностями захоронения, с другой — гидрогеохимическими условиями водоносных комплексов. В совокупности эти причины определяют наряду с разнообразием характера миграционных систем конкретность их пространственного положения. Последнее выражается в том, что каждая из миграционных систем определенным образом расположена по отношению к эксплуатационной скважине и друг к другу.

Технологические особенности захоронения промстоков в напорные водоносные комплексы заключаются в том, что промстоки в них закачиваются под давлением. В результате в пределах участка водоносного комплекса, примыкающего к эксплуатационной скважине, промстоки оттесняют подземную воду и непосредственно взаимодействуют с породой или с породой и газом. Формируются миграционные системы "промсток—порода" или "промсток—порода—газ". С ними непосредственно граничит миграционная система "промсток—подземная вода". Эта система характеризуется преимущественным развитием процессов смешения промстоков с подземной водой, а также процессов, обуславливаемых геохимическими свойствами формирующихся смесей.

Далее формируются миграционные системы "промсток—подземная вода — порода" и "промсток — подземная вода — порода — газ", которые наиболее удалены от эксплуатационной скважины. Эти системы могут сосуществовать или развиваться одна из них. В случае их сосуществования пространственное соотношение между ними может быть различным.

Газы миграционных систем "промсток — порода — газ" и "промсток — подземная вода — порода — газ" представлены кислородом, углекислым газом, сероводородом: кислородом — в случае захоронения промстоков в водоносные комплексы краевых частей артезианских бассейнов, углекислым газом — при захоронении промстоков в водоносные комплексы

любых частей артезианских бассейнов, сероводородом — погруженных частей бассейнов.

Границы миграционных систем, формирующихся при захоронении промстоков в напорные водоносные комплексы артезианских бассейнов, в зависимости от режима закачки промстоков могут заметно и с разной скоростью изменять положение и конфигурацию, что практически не сказывается на характере физико-химических процессов в каждой из миграционных систем.

Давление в пределах участков водоносных комплексов, где происходит закачка, выше по сравнению с участками водоносных комплексов, расположенных вне влияния закачки. Максимальное превышение давления, развиваемого под влиянием закачки промстоков, над природным пластовым давлением водоносного комплекса наблюдается вблизи эксплуатационной скважины, т.е. в пределах миграционных систем "промсток—порода" и "промсток—порода—газ". Оно уменьшается при удалении от эксплуатационной скважины, а именно в направлении к системам "промсток—подземная вода", "промсток — подземная вода — порода" и "промсток — подземная вода — порода — газ". Величины превышения давления, развиваемого при закачке промстоков, над природным пластовым давлением в каждом конкретном случае зависят от режима закачки.

Температура участков водоносных комплексов, испытывающих влияние закачки, в зависимости от температуры закачиваемых промстоков может быть выше или ниже природных температурных условий водоносных комплексов. В соответствии с этим в пределах миграционных систем температура постепенно увеличивается или уменьшается в направлении от эксплуатационной скважины.

Таким образом, в пределах водоносных комплексов артезианских бассейнов под воздействием закачки промстоков возникают две категории закономерностей в изменении термодинамических условий: а) формирование температурного поля, отличного от природных термодинамических условий водоносных комплексов; б) изменение количественных показателей температурного поля в направлении от эксплуатационной скважины к участкам водоносных комплексов с природными термодинамическими условиями.

4.2.3. Формирование химического состава подземных вод в условиях захоронения промстоков

Формирование химического состава подземных вод в условиях подземного захоронения промстоков протекает посредством широко распространенных физико-химических процессов. Однако условия подземного захоронения накладывают отпечаток на формирование состава подземных вод, что делает его по определенным позициям отличным от других антропогенных условий.

Так, захоронение промстоков влияет на природный химический состав подземных вод во всех рассмотренных выше миграционных системах и в каждой из них своеобразно, независимо от того, захороняются ли промстоки в зону азрации или в водонасыщенную зону с различными геолого-гидрогеологическими условиями.

На участке, примыкающем к эксплуатационной скважине, в пределах миграционных систем "промсток — порода" и "промсток — порода — газ" развиваются физико-химические процессы, направленные преимущественно на выщелачивание породы промстоками. Это определяется неравновес-

ностью составных частей рассматриваемых миграционных систем по компонентному составу. Неравновесность сохраняется на всем этапе захоронения вследствие постоянного поступления от эксплуатационной скважины свежих порций промстоков.

В зависимости от технологических условий захоронения промстоков физико-химические процессы в системах "промсток — порода" и "промсток—порода—газ" могут быть стационарными или нестационарными.

Характер процессов выщелачивания в миграционных системах, формирующихся в различных геолого-гидрогеологических условиях, неодинаков.

Главными факторами, определяющими характер процессов выщелачивания, являются литолого-минералогический состав пород и состав промстоков.

Породы водоносных комплексов, наиболее широко используемых для подземного захоронения, с позиций физико-химического взаимодействия с промстоками делятся на две крупные группы: а) изверженные, метаморфические и осадочные терригенные; б) карбонатные.

В соответствии с ними миграционные системы „промсток—порода" и „промсток—порода—газ" конкретизируются на системы: а) „промсток — изверженные метаморфические и осадочные терригенные породы"; б) „промсток — карбонатные породы". В случае засульфаченности или значительных примесей гипсово-ангидритового материала рассматривается система "промсток — сульфатные породы".

В соответствии с участием в физико-химических процессах углекислого газа или кислорода перечисленные выше миграционные системы претерпевают дальнейшую конкретизацию; они становятся более детальными, увеличивается их число.

Далее, миграционные системы могут детализироваться в соответствии с генезисом углекислого газа.

Большое значение для выводов относительно характера физико-химических процессов в рассматриваемых системах имеет учет минералогического состава пород. В связи с этим, например, группу изверженных, метаморфических и осадочных терригенных пород бывает целесообразно подразделить на подгруппы с преобладанием натриевых, кальциевых или магниевых минералов, группу карбонатных пород — на подгруппы известняковых пород и доломитов и т.д.

Влияние промстоков на формирование химического состава подземных вод в условиях захоронения заключается в том, что промсток различного ионного состава и суммарной минерализации по-разному путем различных физико-химических процессов воздействует на одну и ту же породу. Характер промстоков определяет также участие или неучастие газов.

Промстоки, участвующие в формировании миграционных систем "промсток—порода" и "промсток—порода—газ", представлены рассмотренными выше пятью группами.

При сочетании промстоков каждой группы с тремя типами пород образуется множество (минимум 15) систем, характеризующихся своеобразными физико-химическими процессами и своеобразием состава формирующихся в этих системах вод.

В миграционных системах, породы которых представлены изверженными, метаморфическими и осадочными терригенными разностями, развиваются две группы физико-химических процессов (рис. 21).

Одна группа процессов развивается между названными породами и промстоками с суммарной минерализацией до 5 г/л смешанного анионно-катионного состава. Главный физико-химический процесс — углекислотное гидролитическое выщелачивание. В нем участвует углекислый газ различ-

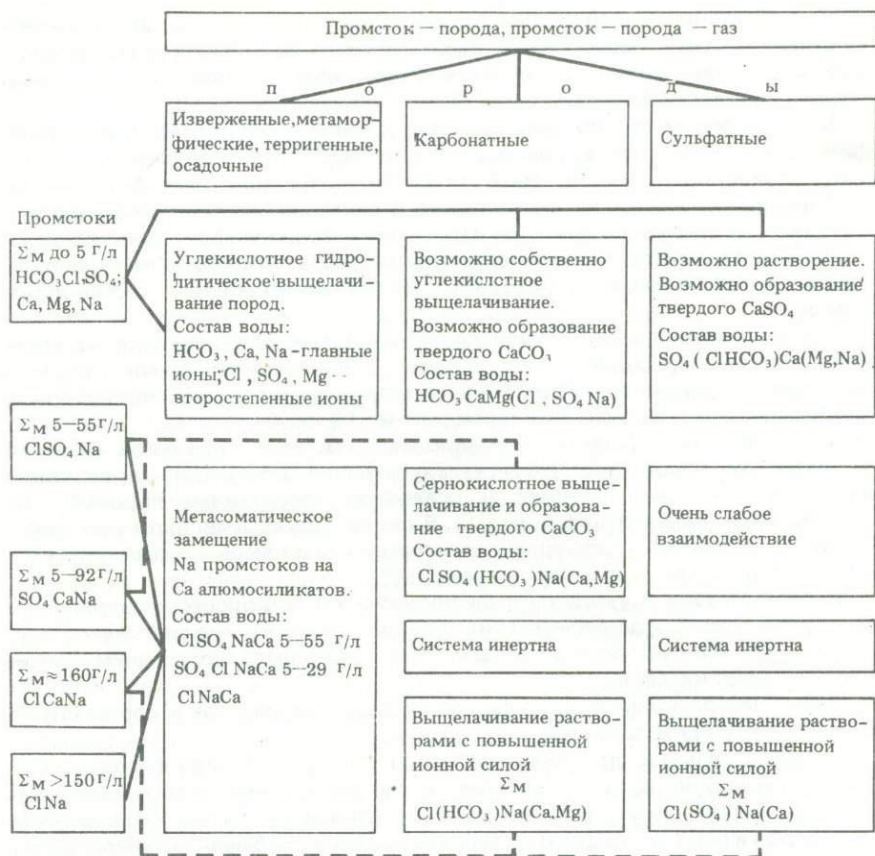


Рис. 21. Схема физико-химических процессов в системах "промсток—порода", "промсток—порода—газ" и состав формирующихся вод

ного происхождения, что зависит от геолого-гидрогеологических условий захоронения. В результате формируются воды с суммарной минерализацией, несколько превышающей 5 г/л. Главными ионами вновь формирующаяся вод являются гидрокарбонат-ион, кальций, натрий (HCO_3 за счет углекислоты, Ca и Na за счет кальциевых и натриевых алюмосиликатных минералов). Второе место занимают хлор, сульфат-ион, магний, которые практически не участвуют в углекислотном выщелачивании пород, в формирующихся водах их концентрации равны изначальным концентрациям в промстоках.

Вторая группа процессов развивается между изверженными, метаморфическими, осадочными терригенными породами и промстоками всех остальных четырех видов. Это главным образом процессы метасоматического замещения натрия промстоков на кальций алюмосиликатных минералов пород. Протекание процессов метасоматического замещения обусловлено: а) повышенной и высокой минерализацией промстоков; б) высокой концентрацией в промстоках натрия; в) наличием кальциевых алюмосиликатных минералов в породах. Газы в процессах метасоматических замещений не участвуют.

В результате процессов метасоматического замещения, развивающихся в системе "промстоки — алюмосиликатные породы", формируются водные растворы трех типов. Состав водных растворов каждого типа определяется, с одной стороны, своеобразием состава отдельных промстоков, с другой — общим процессом обмена натрия промстоков на кальций пород. При этом суммарная минерализация формирующихся водных растворов близка к суммарной минерализации промстоков.

Первый тип водных растворов формируется при взаимодействии с алюмосиликатными породами промстоков состава ClSO_4Na , $\Sigma_{\text{M}} 5-55$ г/л; состав формирующейся воды ClSO_4NaCa при почти тех же величинах суммарной минерализации. Второй тип формирующихся водных растворов — растворы SO_4ClNaCa состава с $\Sigma_{\text{M}} 5-92$ г/л — соответствует промстоку SO_4ClNa состава (см. рис. 21).

Третий тип водных растворов имеет ClNaCa состав; формируется из промстоков ClNaCa и ClNa составов. Суммарная минерализация водных растворов третьего типа или близка к 160 г/л (в случае участия в их формировании ClNaCa промстока), или > 150 г/л (ClNa промстока).

В миграционной системе "промсток — карбонатные породы" физико-химические процессы представлены разными видами выщелачивания, а также в некоторых случаях выпадением из растворов слаборастворимых соединений. Наиболее широко распространены три вида выщелачивания промстоками карбонатных пород: 1) углекислотное; 2) сернокислотное; 3) выщелачивание растворами с повышенной ионной силой. Действие каждого из названных видов выщелачивания определяется особенностями в составе промстоков.

Углекислотному выщелачиванию подвержены карбонатные породы со стороны промстоков, имеющих смешанный анионно-катионный состав и суммарную минерализацию до 5 г/л. В выщелачивании участвует углекислый газ. Вследствие этого процесса формируются воды, в которых главным анионом становится гидрокарбонат-ион, а хлор и сульфат-ион сохраняются в качестве второстепенных ионов; катионный состав формирующихся водных растворов соответствует выщелачиваемым из карбонатных пород компонентам — кальцию и магнию. Натрий имеет второстепенное значение (см. рис. 21).

Сернокислотному выщелачиванию подвергаются карбонатные породы при воздействии на них промстоков с высоким содержанием сульфат-иона (промстоки ClSO_4Na и SO_4ClNa состава со значительной суммарной минерализацией). В результате сернокислотного выщелачивания карбонатных пород воды обогащаются гидрокарбонат-ионом, кальцием, магнием (см. рис. 21).

Процессы углекислотного и сернокислотного выщелачивания карбонатных пород вследствие поступления в воды гидрокарбонат-иона, кальция, магния, при достижении определенных их концентраций и перенасыщении по карбонату кальция и магния, могут осложняться процессами выпадения из вод этих соединений.

В выщелачивании карбонатных пород растворами с повышенной ионной силой участвуют высокоминерализованные промстоки ClNa состава. В результате этого процесса формируются водные растворы с повышенными концентрациями гидрокарбонат-иона, кальция, магния, но по соотношению с хлором и натрием эти ионы остаются второстепенными. Суммарная минерализация вновь формирующихся вод по сравнению с промстоками изменяется слабо.

В миграционной системе "промсток—сульфатные породы" на участках захоронения промстоков развиваются две группы процессов: 1) процессы

растворения; 2) процессы выщелачивания растворами с повышенной ионной силой.

Растворению сульфатные породы подвергаются со стороны слабоминерализованных промстоков смешанного ионного состава. Формирующиеся воды получают за счет сульфатных пород дополнительные количества сульфат-иона и кальция, вследствие чего эти ионы в формирующихся водах становятся главными, а хлор, гидрокарбонат-ион, натрий, магний — второстепенными (см. рис. 21).

Выщелачиваются растворами с повышенной ионной силой сульфатные породы, как и карбонатные, тогда, когда промстоки имеют хлоридный натриевый состав и высокую суммарную минерализацию. В результате формируются хлоридно-сульфатные натриево-кальциевые воды; суммарная минерализация по сравнению с минерализацией промстоков изменяется незначительно.

Промстоки ClCaNa состава с $\Sigma_{\text{M}} \approx 160$ г/л по отношению к карбонатным и сульфатным породам практически не проявляют выщелачивающих свойств, и системы, образованные этими промстоками с карбонатными и сульфатными породами, являются в физико-химическом отношении инертными. Очень слабо взаимодействуют с сульфатными породами также промстоки с большими концентрациями сульфат-иона, т.е. промстоки $\text{ClSO}_4 \text{Na}$ и $\text{SO}_4 \text{ClNa}$ состава.

Рассмотренные выше физико-химические процессы в системах "промсток—порода" и "промсток—порода—газ" представляются как наиболее типичные процессы с наиболее типичным составом формирующихся растворов. В природе при подземном захоронении промстоков возможно более сложное сочетание процессов и формирование более разнообразных по составу и суммарной минерализации водных подземных растворов.

В пределах миграционной системы "промсток—подземная вода", расположенной на границе миграционных систем "промсток—порода" и "промсток—подземная вода — порода", формируются своеобразные гидрогеохимические условия, свойственные данной системе и определяемые смешением промстоков с подземными водами.

Смеси промстоков с подземными водами разнообразны по суммарной минерализации и ионному составу. В каждом конкретном случае состав смесей определяется прежде всего составом промстоков и подземных вод. Однако иногда состав смесей характеризуется специфическими свойствами, обусловливаемыми особенностями геолого-гидрогеологических и геохимических условий, способствующих развитию в ходе смешения ряда других физико-химических процессов. Ими могут быть процессы выщелачивания смесями пород, процессы образования твердых осадков и выпадения их из смесей и др.

Процессы выщелачивания пород вследствие размещения системы "промсток—подземная вода" на незначительных по размеру площадях не существенны. Процессы же образования твердых осадков и удаления их из смесей ввиду широкого распространения условий геохимической неравновесности смесей по слаборастворимым соединениям во многих случаях могут протекать интенсивно. Поэтому, несмотря на то что система "промсток — подземная вода" занимает обычно незначительное пространство, эти процессы оказывают большое влияние на состав смесей.

В целом смешение при решении проблемы подземного захоронения промстоков следует рассматривать как комплексный процесс, в котором наряду с формированием смесей участвуют и физико-химические процессы.

В результате гипотетических построений, проведенных на основании

сравнительного анализа компонентного состава промстоков и подземных вод, получен предполагаемый ориентировочный состав смесей, который характеризует каждую смесь по основным ионам и по их сумме (рис. 22). Сравнительному анализу были подвергнуты пресные и минерализованные подземные воды, наиболее распространенные в грунтовых и пластовых водоносных комплексах, предназначенных для захоронения промстоков. Промстоки представлены пятью основными группами, характеризующими стоки промышленных предприятий, которые подвергаются преимущественно захоронению (см. рис. 22).

В результате смешения пяти промстоков с подземными водами пяти геохимических типов на участках подземного захоронения могут иметь место минимум 25 смесей с различным составом (см. рис. 22). Суммарная минерализация смесей от 5 до 392 г/л; в ионном составе в качестве главных анионов присутствуют чаще всего хлор, а также сульфат-ион или гидрокарбонат-ион, а в качестве главных катионов — натрий или кальций. Присутствие в смесях одновременно нескольких ионов в существенных процентных концентрациях наблюдается редко.

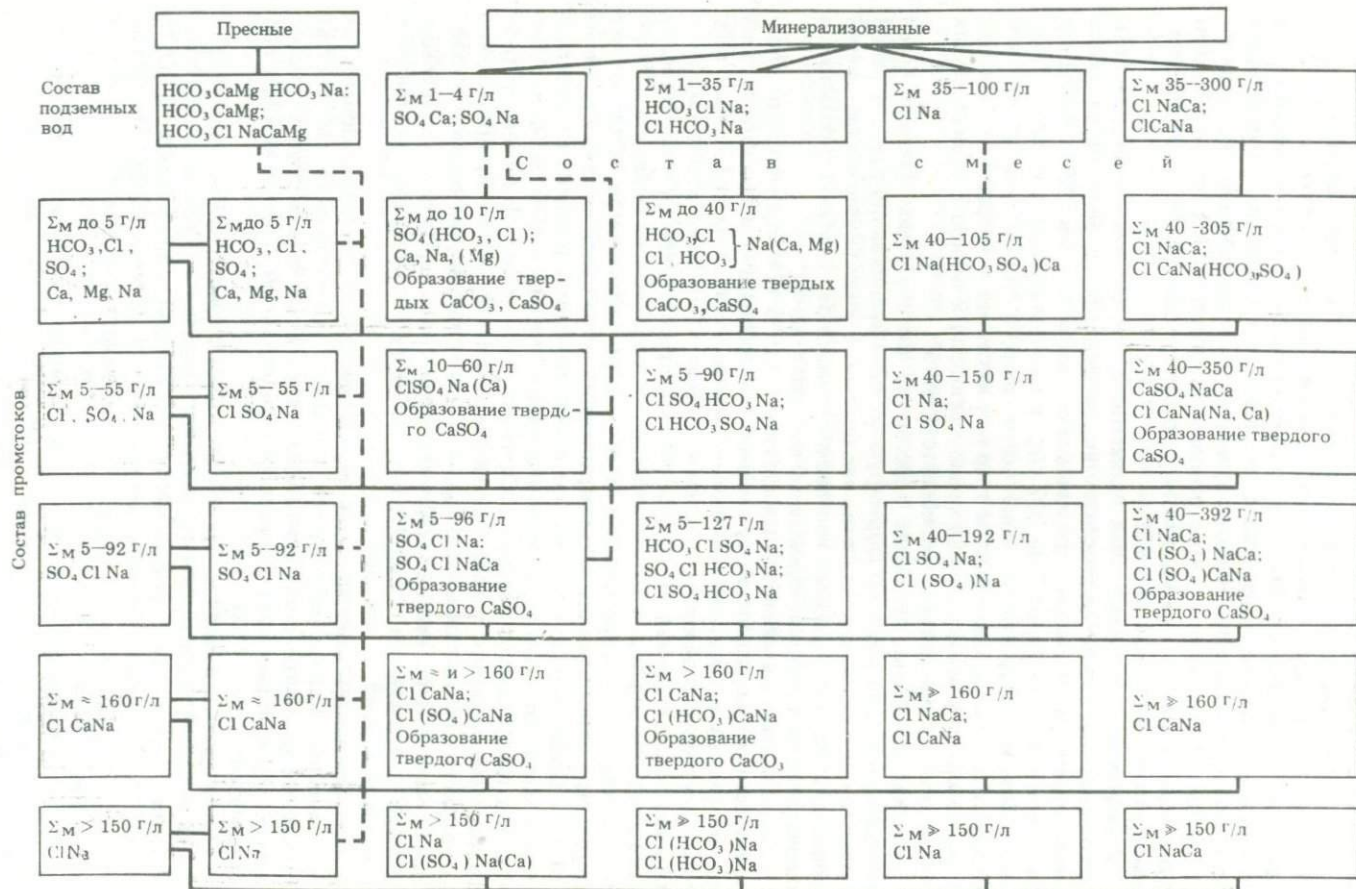
Из рис. 22 видно, что более простые по составу смеси (первый слева вертикальный ряд смесей) формируются преимущественно при смешении промстоков с пресными подземными водами. В этом случае состав смесей определяется, как правило, составом промстоков, особенно промстоков с повышенной и высокой суммарной минерализацией.

При смешении слабоминерализованных (до 5 г/л) промстоков с подземными водами различной суммарной минерализации и ионного состава состав смесей определяется главным образом составом подземных вод. Чем более минерализованы подземные воды, тем ближе состав смесей к составу подземных вод. На рис. 22 эти смеси расположены в первом сверху горизонтальном ряду. Среди смесей этого ряда можно выделить вторую левую, состав которой отличен и от состава промстоков, и от состава подземных вод. Суммарная минерализация этой смеси около или менее 10 г/л. Среди анионов в качестве преобладающего выделяется сульфат-ион, а среди катионов — кальций и натрий, но наряду с этими ионами существенно содержание остальных (Cl, HCO₃, Mg) ионов. Эта смесь формируется при смешении слабоминерализованных (Σ_{M} до 5 г/л) промстоков со слабоминерализованными (Σ_{M} до 4 г/л) подземными водами состава SO₄Ca или SO₄Na, приуроченными к терригенно-карбонатным засульфаченным отложениям, слагающим неглубоко залегающие водоносные комплексы.

При смешении минерализованных промстоков с минерализованными подземными водами образуются довольно разнообразные по составу смеси, которые можно систематизировать, выделив четыре группы смесей, каждая из которых характеризуется присущими ей геохимическими особенностями.

Первая группа смесей. В нее входят смеси с суммарной минерализацией 5–90 и 5–127 г/л смешанного анионного состава с преобладанием среди катионов натрия. Они формируются при смешении промстоков ClSO₄Na и SO₄ClNa состава с подземными водами HCO₃ClNa и ClHCO₃Na состава в условиях терригенных и карбонатных отложений краевых частей артезианских бассейнов.

Вторая группа смесей. В них главными анионами являются хлор и сульфат-ион, а главными катионами — натрий и кальций. Формируются при смешении промстоков ClSO₄Na и SO₄ClNa состава с подземными водами SO₄Ca и SO₄Na, ClNa, ClNaCa и ClCaNa состава. По соотношению между хлором и сульфат-ионом, а также натрием и кальцием эта группа смесей



делится на две подгруппы. В смесях первой подгруппы $SO_4 > Cl$ и $Na > Ca$, Σ_M 10–60 и 5–96 г/л. Их формирование происходит в условиях терригенно-карбонатных засульфаченных отложений, слагающих неглубоко залегающие пластовые водоносные комплексы. В смесях второй подгруппы $Cl > SO_4$, соотношение между Ca и Na изменчиво, суммарная минерализация 40–150, 40–192, 40–350, 40–392 г/л. Эти смеси формируются при захоронении промстоков в глубокие водоносные комплексы артезианских бассейнов, водовмещающие породы которых представлены терригенными или карбонатными отложениями.

Третья группа смесей. Главный анион — хлор, дополнительные — или сульфат-ион, или гидрокарбонат-ион; катионный состав натриево-кальциевый или кальциево-натриевый. В формировании этих смесей участвуют высокоминерализованные промстоки $ClCaNa$ и $ClNa$ состава и слабоминерализованные подземные воды SO_4Ca и SO_4Na , а также HCO_3ClNa и $ClHCO_3Na$ состава. Высокая суммарная минерализация смесей и преобладание в них хлора — результат существенного влияния на них промстоков. Смеси данной группы могут формироваться при захоронении промстоков в неглубокие водоносные комплексы, сложенные засульфаченными терригенно-карбонатными отложениями, или в водоносные комплексы краевых частей артезианских бассейнов, сложенные терригенными или карбонатными отложениями.

Четвертая группа смесей. Это наиболее минерализованные (значительно выше 150 г/л) смеси $ClNa$, $ClNaCa$ и $ClCaNa$ состава. Они являются результатом смешения высокоминерализованных промстоков $ClNa$ и $ClCaNa$ состава с минерализованными подземными водами близкого к промстокам состава. Эти смеси формируются при использовании для захоронения промстоков водоносных комплексов, сложенных терригенными и карбонатными отложениями значительно погруженных (свыше 2000 м) частей артезианских бассейнов.

Более детальная количественная характеристика смесей промстоков с подземными водами может быть дана на основании экспериментальных данных.

Экспериментальное изучение смешения промстоков с подземными водами осуществлялось в статических условиях при атмосферном давлении и температуре в стеклянных сосудах. Время отстаивания смесей изменялось от 1–2 сут до 1,5 мес. Смешивание проводилось в соотношениях 1:2 (одна часть промстока, две части подземной воды), 1:1, 2:1, а также в соотношениях 2:3, 1:1, 3:2.

Для экспериментального изучения смешения брались промстоки различного компонентного состава и суммарной минерализации и минерализованные подземные воды (последние исходя из того, что наиболее распространено захоронение в глубокие водоносные комплексы).

Характерные черты полученных смесей; а) повышенная по сравнению с промстоками суммарная минерализация; б) близость компонентного состава к составу подземных вод (табл. 29).

Как отмечено выше, формирование ряда смесей промстоков с подземными водами сопровождается образованием твердых осадков и выпадением их из смесей. Осадки представлены слаборастворимыми карбонатами кальция и сульфатами кальция. Выделяются группы смесей, характеризующихся выпадением из них в твердом виде или карбоната кальция, или сульфата кальция, или одновременно того и другого. Образование послед-

Рис. 22. Геохимическая характеристика смесей промстоков с подземными водами разного состава

Таблица 29
Примеры состава смесей промстоков
с подземными водами глубоких водоносных комплексов

Формула химического состава подземной воды, промстока, смеси (пропорция смешения)	ΣM_i , г/л подземной воды, промстока, смеси	Ионный состав смеси						pH
		Cl	SO ₄	HCO ₃ + CO ₃	Na	Mg	Ca	
ClNa	263,0	110605,4	1240,7	152,5	65670,0	888,3	4393,2	
SO ₄ ClNa	5,6	3119,2	25,8	2,5	2855,2	73,1	219,2	7,4
ClNa; 1:2	182,9	49,6	0,4	—	45,4	1,1	3,5	
ClNa	263,0	55302,7	1507,6	122,0	33144,4	444,3	2312,1	
SO ₄ ClNa	5,6	1559,6	31,4	2,0	1441,0	36,5	115,4	7,8
ClNa; 2:1	92,8	49,0	1,0	—	46,2	1,2	3,6	
		7910,0	16320,0		12420,0	150,0	160,0	
		223,0	340,0	Не обн.	540,0	12,0	8,0	
SO ₄ ClNa; 2:3	36,9	19,6	30,4		48,2	0,9	0,9	
		9790,0	21120,0		15860,0	130,0	340,0	
		280,0	440,0	Не обн.	690,0	10,0	20,0	
SO ₄ ClNa; 1:1	47,2	19,5	30,5		47,9	0,7	1,4	
		6020,0	26880,0		16320,0	130,0	100,0	
		170,0	560,0	Не обн.	710,0	10,0	10,0	
SO ₄ ClNa; 3:2	49,5	11,5	38,5		48,6	0,7	0,7	
ClNa	162,3	139712,4	832,4	97,6	48505,0	Не обн.	37074,0	
ClCaNa	226,2	3940,0	17,32	1,6	2108,9		1850,0	7,7
ClNaCa; 1:2		49,8	0,2	—	26,6		23,4	
		118436,4	780,0	36,6	46636,0	364,8	26052,0	
		3340,0	16,24	0,6	2027,64	30,0	1300,0	8,4
ClNaCa; 2:1	192,3	49,7	0,3	—	30,2	0,5	19,3	

Примечание. В графах ионного состава смеси первая величина — в мг/л, вторая — в мг-экв/л, третья — в экв %.

них происходит в случаях, когда в смесях оказываются в достаточных для перенасыщения количествах гидрокарбонат-ион, сульфат-ион, кальций; при смешивании минерализованных промстоков ClNa и ClCaNa состава с минерализованными близкими по составу подземными водами выпадения в осадок карбонатов кальция и магния и сульфата кальция не ожидается. При смешивании же остальных групп промстоков с подземными водами возможно образование осадков.

Образование твердого карбоната кальция приурочено к смесям, формирующимся при смешении промстоков ClCaNa состава с подземной водой HCO₃ ClNa и ClHCO₃Na состава. В связи со значительными концентрациями гидрокарбонат-иона в подземной воде и кальция в промстоках следует ожидать образования значительных количеств осадка кальция.

Образование твердого сульфата кальция приурочено к двум группам смесей. Одну группу смесей формируют промстоки Cl SO₄Na и SO₄ п. Cl Na состава и подземные воды ClNaCa и ClCaNa состава, вторую — промстоки ClSO₄Na, SO₄ ClNa и ClCaNa состава и подземные воды SO₄ Ca или SO₄ Na состава. Так как в первом случае смешиваются промстоки и подземные воды высокой минерализации, возможно образование значительных количеств осадка сульфата кальция. Во втором случае в смешении участвуют мало минерализованные

зованные подземные воды ($\Sigma_{\text{M}} 1-4$ г/л), вследствие чего осадок сульфата кальция образуется в небольших количествах.

Образование одновременно CaCO_3 и CaSO_4 возможно при смешении промстока с суммарной минерализацией до 5 г/л смешанного анионно-катионного состава с подземными водами SO_4Ca и SO_4Na состава ($\Sigma_{\text{M}} 1-4$ г/л) и HCO_3CaNa , CaHCO_3Na состава ($\Sigma_{\text{M}} 1-35$ г/л); количество осадков зависит от конкретной минерализации подземных вод в каждом отдельном случае.

Количественная оценка процесса образования и выпадения осадка из смесей промстоков с подземными водами приводится по экспериментальным данным.

Эксперименты по выпадению из смесей в осадок слабо растворимых соединений проводились с промстоками, характеризующимися повышенными концентрациями сульфат-иона и гидрокарбонат-иона, и с подземными водами, содержащими повышенные количества кальция.

При смешении с подземной водой промстока с повышенной концентрацией гидрокарбонат-иона образовался осадок, полностью представленный минеральными веществами. Минеральная природа осадка установлена путем его обработки прокаливанием при температуре 500°C . Из 30 мл смеси (1:1) были получены три порции осадка весом 0,061; 0,052; 0,054; после прокаливания вес порций осадка не изменился, что явилось свидетельством отсутствия в осадке органических веществ. Осадок состоял из кальция, магния, кремния (1,0%), алюминия (0,3-1,0%), железа, натрия (0,1-0,3%); в незначительных количествах присутствовали марганец, стронций (0,01-0,04%), в тысячных и десятитысячных долях процента были зафиксированы барий, хром, олово, медь и некоторые другие металлы. Кальций и магний представлены в осадках преимущественно в виде сульфатов (в осадках содержится 3,84% серы в форме SO_4 и 0,89% в форме SO_3) и карбонатов кальция и магния.

При смешении с подземной водой промстока с повышенной концентрацией сульфат-иона образовался осадок, в составе которого более 1% кальция, от 1,0 до 0,3% магния, около 0,1% натрия, от 0,01 до 1,0% кремния, от 0,03 до 0,1% алюминия и железа. Установлено высокое содержание в осадке серы (11,86%).

Данный осадок также разделялся на минеральную и органическую части путем прокаливания. Оказалось, что основную часть осадка составляют минеральные вещества, представленные главным образом сульфатами кальция. Ширина зоны смешения в пределах миграционной системы "промсток-подземная вода" — результат одновременного проявления потока сточных вод и природного движения подземных вод водоносного комплекса, используемого для захоронения.

В этих условиях движение промстока подчиняется конвективно-диффузионному переносу. Граница между промстоком и подземной водой в большинстве случаев не имеет вида резкого фронта, перемещающегося со средней скоростью фильтрационного потока. Чаще всего формируется зона со слабым изменением (уменьшением) концентрации компонентов промстока в направлении движения, что обуславливается поперечной и продольной микродисперсиями. Поперечная микродисперсия развивается в направлении, перпендикулярном направлению движения подземных вод, и состоит в отклонении струек промстока в поровых каналах и трещинах породы от среднего направления фильтрационного потока. Под влиянием этого процесса формируются поперечные размеры зоны смешения.

Продольная микродисперсия развивается в направлении фильтрационного потока за счет того, что струйки промстока, имеющие на входе в водо-

носный комплекс равные концентрации вещества и равные величины скорости движения и являющиеся параллельными по направлению движения, далее, при движении по извилистым поровым каналам, приобретают различные направленность и скорости движения. Увеличиваются продольные размеры зоны смешения. В комплексе поперечная и продольная микродисперсии формируют зону смешения в целом.

Ширина зоны смешения в различных регионах и разных водоносных комплексах одного региона различна. Различие определяется степенью проявления микродисперсии, характером макродисперсии, зависящей от фильтрационного строения водоносного комплекса, а также геохимическими свойствами промстоков. Последние оказывают влияние на ширину зоны смешения через суммарную минерализацию. Промстоки с относительно низкой суммарной минерализацией вследствие малой вязкости склонны к более значительным проявлениям продольной микродисперсии, а поэтому зона смешения их с подземными водами шире по сравнению с зоной смешения, формирующейся на основе промстоков с относительно высокой суммарной минерализацией.

Форма зон смешения обычно сложная. Она зависит от минерализации промстоков и подземных вод и от ряда геолого-гидрогеологических особенностей участка захоронения промстоков. Промстоки различной минерализации имеют разный удельный вес; их распределение по вертикали в пределах участка захоронения подчиняется закону гравитации и находится в разном соотношении с подземной водой. В случае, если промстоки менее минерализованы, чем подземная вода, они занимают более верхнее положение по сравнению с подземной водой. Граница раздела между менее минерализованными промстоками и более минерализованными подземными водами вытянута по направлению фильтрационного потока. Размеры вытянутости тем больше, чем значительнее скорость фильтрации.

Более минерализованные промстоки располагаются ниже менее минерализованных подземных вод. Граница их раздела вытянута в обратном направлении.

Для оценки границы раздела между промстоками и подземными водами, т.е. для определени формы зоны смешения, предложен ряд решений. По данным Ф.М. Бочевера и А.Е. Орадовской, длина границы раздела между промстоком и подземной водой при прочих равных условиях (одинаковом градиенте удельных весов и др.) тем больше, чем значительнее проницаемость пород-коллекторов и их мощность.

К геологическим особенностям, влияющим на форму зоны смешения, можно отнести структурные условия, выраженные через чередование положительных и отрицательных структурных элементов. Их пространственное положение обуславливает своеобразие в размещении промстоков и подземных вод с различными удельными весами, что отражается на форме зоны смешения. Из гидрогеологических особенностей, усложняющих форму зоны смешения промстоков с подземной водой, следует отметить микрофильтрационную неоднородность пласта-коллектора.

Зона смешения промстоков с подземной водой непостоянна в пространстве. Она в период захоронения промстоков передвигается, что обусловлено увеличением во времени объема захороняемых промстоков. Передвижение зоны смешения происходит в направлении фильтрационного потока. Скорость передвижения зоны смешения зависит главным образом от режима закачки в водоносный комплекс промстоков.

Миграционная система "промсток — подземная вода — порода" наиболее обширная и сложная из всех систем, формирующихся при подземном захоронении промстоков. Ее относительно большие размеры определяются

значительным временем формирования, охватывающим период захоронения и следующий за ним период.

Характерной особенностью данной системы является ее зональное строение, проявляющееся в закономерном уменьшении концентрации компонентов промстоков в подземных водах в направлении фильтрационного потока и тем самым отличающее ее от системы "промсток — подземная вода". Для последней, как и для данной системы, характерно уменьшение концентрации компонентов промстоков, но оно охватывает равномерно практически целиком всю систему "промсток — подземная вода", так как является результатом процесса выпадения из смесей твердых осадков, распространенного на всей площади развития системы.

Уменьшение концентрации компонентов промстоков в подземных водах системы "промсток — подземная вода — порода" происходит вследствие разубоживания промстоков подземными водами, объемы которых возрастают в направлении фильтрационного потока. Следовательно, зональное строение рассматриваемой системы связано с процессами массопереноса.

Массоперенос промстоков в этих системах представлен конвективно-диффузионным процессом, интенсивность которого и направленность определяются скоростью фильтрационного потока и направлением его движения.

Одновременно с массопереносом в пределах системы "промсток — подземная вода — порода" протекают процессы массообмена между породой и смесью промстока с подземной водой.

В отличие от системы "промсток — подземная вода" в пределах рассматриваемой системы практически отсутствует процесс образования и выпадения из смесей твердых веществ, так как этот процесс интенсивно протекает в предыдущей миграционной системе и приводит к тому, что в рассматриваемой системе промсток и подземная вода уже равновесны по геохимическим показателям.

Процессы массообмена в системе "промсток—подземная вода—порода" представлены различными видами выщелачивания, метасоматическими и сорбционными процессами. Они являются следствием концентрационного градиента или энергетического несоответствия между породой и смесями.

Концентрационный градиент возникает либо при наличии компонента (компонентов) и в смеси и в породе, когда имеет место разница в их содержании, либо при условии отсутствия компонента (компонентов) или в смеси, или в породе.

Концентрационное состояние смеси промстока с подземной водой может быть по отношению к породе положительным или отрицательным. В первом случае концентрация компонента (компонентов) в породе больше, чем в смеси промстока с подземной водой, во втором концентрация компонента в смеси превышает его концентрацию в породе. В соответствии с этими условиями неравновесности в системе "промсток—подземная вода—порода" развиваются процессы двух видов: 1) выщелачивание породы смесью промстока с подземной водой; 2) сорбция компонентов породой из смеси промстока с подземной водой или обмен компонентами между породой и смесью.

Процессы массообмена, развивающиеся в системе "промсток — подземная вода — порода" по ряду признаков отличаются от процессов в системе "промсток — порода". Процессы выщелачивания в случае системы "промсток — порода" вследствие большого разнообразия промстоков, воздействующих на терригенные, карбонатные, сульфатные породы, пред-

ставлены значительным разнообразием — углекислотным, сернокислотным, растворами с повышенной ионной силой, метасоматическим выщелачиванием.

Такое разнообразие процессов выщелачивания для системы "промсток — подземная вода — порода" выдерживается частично, а именно для случаев, когда эта система развивается в пределах грунтового или пластовых водоносных комплексов верхней части земной коры. В случае ее приуроченности к артезианским бассейнам вследствие значительной минерализации подземных вод формируются смеси, близкие к подземным водам и поэтому мало различающиеся друг от друга по минерализации и компонентному составу, и процессы выщелачивания ограничиваются выщелачиванием растворами с повышенной ионной силой и метасоматическим.

Для системы "промсток — подземная вода — порода" характерны сорбционные процессы, практически отсутствующие в системе "промсток — порода". Их развитие в названной миграционной системе обуславливается повышенной дисперсностью пород. Степень их дисперсности в районах с различным геологическим строением неодинакова; в связи с этим неодинакова и интенсивность сорбционных процессов, но в любом случае она значительно меньше, чем в системе "промсток — порода".

Конкретное проявление процессов массообмена в системе "промсток — подземная вода — порода" зависит от состава пород и смесей.

По характеру взаимодействия со смесями промстоков и подземных вод породы рассматриваемой системы делятся на три группы: а) карбонатные; б) песчаные; в) глинистые.

Взаимодействие смесей с карбонатными породами происходит посредством выщелачивания или породы инертны по отношению к смесям.

Углекислотному выщелачиванию карбонатные породы подвергаются в условиях грунтового и неглубоких напорных водоносных комплексов со стороны слабоминерализованных смесей, в составе которых присутствуют любые компоненты, кроме сульфат-иона. В этих же условиях сернокислотное выщелачивание развивается в системе "карбонатная порода — смесь" в случае, когда смеси содержат повышенные концентрации сульфат-иона.

В выщелачивании карбонатных пород смесями с повышенной ионной силой участвуют минерализованные смеси хлоридного натриевого состава. Этот процесс наиболее широко развит при захоронении промстоков в водоносные комплексы артезианских бассейнов.

В системе, представленной карбонатной породой и минерализованными, с высоким содержанием кальция (магния), смесями, физико-химические процессы практически не развиваются, и эту систему относительно физико-химических процессов следует отнести к инертной.

Физико-химическое взаимодействие смесей с песчаными породами в значительной степени зависит от минералогического состава последних. Выделяются алюмосиликатные и силикатные песчаные породы. В условиях грунтового и неглубоких напорных водоносных комплексов с алюмосиликатными песчаными породами смеси взаимодействуют по типу гидrolитического углекислотного выщелачивания. Такое взаимодействие лимитируется, помимо минералогического состава песчаных пород, также составом смесей; смеси должны быть пресными или слабоминерализованными. Между минерализованными смесями и алюмосиликатными песчаными породами развивается процесс метасоматоза. Метасоматическому замещению в породе подлежит кальций; он замещается натрием смеси. Поэтому состав смесей, принимающих участие в метасоматическом процессе, хлоридный натриевый.

С силикатными песчаными породами смеси промстоков и подземных вод практически не взаимодействуют.

Процессы массообмена изучались экспериментально путем фильтрации смесей промстоков с подземной водой через карбонатные и терригенные породы. Фильтрация осуществлялась при атмосферных и пластовых термодинамических условиях. Термодинамические параметры, соответствующие условиям захоронения промстоков, представлены температурой от 20 до 60°С, пластовым давлением от 100 до 300 атм.

Породы в экспериментах отражали особенности пород-коллекторов, используемых для подземного захоронения промстоков. Они были представлены известняками, доломитизированными известняками и песчаниками. Состав известняков (%): CaO — 48–50; MgO — 4,0–4,3; SO₃ — следы. Состав доломитизированных известняков (%): CaO — 34,4; MgO — 17,7; SO₃ — следы. Состав песчаников (%): SiO₂ — 87,16; TiO₂ — 0,73; P₂O₅ — 0,09; Al₂O₃ — 3,35; Fe₂O₃ — 1,31; FeO — 0,93; MgO — 2,44; CaO — 0,53; Na₂O — 0,21; K₂O — 1,17; п.п. — 2,50.

Смеси промстоков с подземной водой были разной суммарной минерализации при устойчивом компонентном составе. В эксперименте с песчаником они были получены в результате смешения промстока сульфатного натриевого состава с минерализацией 8,0 г/л с подземной водой хлоридного натриево-кальциево-магниевого состава с минерализацией 114 г/л. Смеси, составленные в соотношениях подземной воды к промстоку 1:2 и 2:1, характеризовались суммарной минерализацией: первая — 43,5 г/л, вторая — 79,4 г/л при хлоридном натриевом компонентном составе.

Минерализация и компонентный состав этих смесей в результате фильтрации через песчаник практически не изменялись, что объясняется кварцевым характером песчаника и чрезвычайно слабым его выщелачиванием.

В экспериментах с карбонатными породами через известняк и доломитизированный известняк фильтровались смеси хлоридного натриевого состава с суммарной минерализацией 178 и 206 г/л. При фильтрации происходило незначительное выщелачивание растворами с повышенной ионной силой карбонатных пород, что фиксировалось повышением содержания в фильтрах кальция и магния.

Глинистые породы представляют особую группу по характеру взаимодействия со смесями промстоков и подземных вод. С этими породами смеси взаимодействуют по типу сорбции, представленной обычно в этих условиях адсорбцией и катионным обменом.

Глинистыми породами из смесей промстоков с подземными водами сорбируются компоненты, отсутствующие в поглощенном комплексе глинистых частиц или присутствующие в нем в малых концентрациях. К таким компонентам относятся микрокомпоненты промстоков и ряд макрокомпонентов. Из макрокомпонентов возможно ожидать адсорбцию глинистыми частицами из смесей промстоков с подземными водами кальция. Адсорбция кальция может осуществляться в тех случаях, когда формирующиеся смеси обогащены за счет промстоков кальцием и эти смеси замещают подземные воды с малыми концентрациями кальция. Создаются условия неравновесного состояния по кальцию между смесью промстоков с подземными водами и глинистыми породами, вследствие чего кальций сорбируется породой. В частности, сорбцию кальция глинистой породой можно ожидать в случаях взаимодействия с глинистой породой смесей промстоков с подземными водами составов ClNaCa и ClCaNa с различной суммарной минерализацией, а также составов SO₄ (HCl, Cl) Ca (Na, Mg) с суммарной минерализацией до 10 г/л.

Состав катионов, участвующих в обменных реакциях, определяется составом поглощенного комплекса породы и катионным составом смеси.

При подземном захоронении промстоков в глубокие водоносные комплексы среди поглощенных катионов глинистых пород, имеющих в этом случае морской генезис, преобладает натрий. Поэтому в обменных реакциях с глинистыми породами участвуют смеси с высокими концентрациями кальция; это чаще всего минерализованные смеси хлоридного кальциево-натриевого и натриево-кальциевого состава.

При подземном захоронении промстоков в грунтовый водоносный комплекс глинистые отложения в преобладающем большинстве случаев имеют континентальный генезис; главными поглощенными катионами в них являются кальций и магний. Следовательно, к обменным процессам в этом случае склонны смеси промстоков и подземных вод с повышенными концентрациями натрия. Это прежде всего минерализованные смеси хлоридного натриевого состава, а также целый ряд смесей незначительной минерализации и более сложного ионного состава.

4.3. Гидрогеохимический прогноз подземного захоронения промстоков

4.3.1. Геолого-гидрогеологическое обоснование процессов формирования химического состава подземных вод в условиях захоронения промстоков

Основными прогнозными задачами миграционного характера при подземном захоронении промстоков являются: 1) определение концентрации компонентов промстоков в подземных водах через время t ; 2) определение концентрации компонентов промстоков в подземных водах на расстоянии x ; 3) определение времени и расстояния, за которые концентрация компонентов промстоков в подземных водах будет C_1, C_2, \dots и т.д.; 4) определение времени и расстояния¹, за которые концентрация компонентов промстоков в подземных водах приблизится или к допустимым нормам, или к нулю, или к фоновым концентрациям, свойственным природным условиям.

При их решении рассматриваются два следующих один за другим этапа: первый — захоронение промстоков; второй — после захоронения промстоков.

На первом этапе влияние закачки промстоков в водоносный комплекс распространяется на сравнительно небольшие расстояния, составляющие часто несколько километров за десятилетия, и распространение промстоков в значительной степени определяется объемом захороняемых промстоков и давлением закачки. На этом этапе решаются первые три вида задач.

Второй этап — время после окончания закачки промстоков в водоносный комплекс. Он характеризуется региональным распространением промстоков по потоку подземных вод. Длительность этого этапа определяется скоростью движения подземных вод, диффузионной активностью компонентов промстока и особенностями взаимодействия сложной смеси промстоков и подземных вод с вмещающими породами. Прогноз в этом

¹ Определение расстояния, на котором концентрация компонентов промстоков будет C_1, C_2, \dots и т.д.

случае заключается в определении расстояния и времени, за которые произойдет снижение концентрации компонентов промстоков до допустимой нормы или фона.

Необходимость прогноза второго этапа может быть подтверждена ориентировочным расчетом: если в участок водоносного комплекса радиусом 100 км, мощностью 0,3 км, со средней пористостью пород 10% в течение 30 лет закачивать промстоки расходом до 10 тыс. м³/сут, то при полном смешивании промстоков с подземной водой они достигнут в этом радиусе концентрации 10% от первоначальной, что в некоторых случаях может оказаться выше предельно допустимой нормы.

Расчетные схемы прогноза распространения промстоков в водоносных комплексах с различным строением участков захоронения приводятся в работах А.С. Белицкого [1976], А.Е. Орадовской, Ф.М. Бочевера и др. [1979] и др. Многие из расчетных схем предусматривают решение прогнозных задач миграции промстоков с учетом большого числа особенностей строения водоносных комплексов, таких, как схемы фильтрационного потока, постоянства расхода промстоков, фильтрационной однородности и неоднородности поглощающих горизонтов, ограниченности поглощающих горизонтов водоупорными слоями и пр.

Типовые условия наиболее распространенных видов захоронения слагаются из ряда конкретных геолого-гидрогеологических параметров. Исходя из того что чаще всего подземное захоронение промстоков осуществляется в глубокие водоносные комплексы, геолого-гидрогеологические параметры в схеме типовых условий отражают условия этих комплексов.

Геолого-гидрогеологические параметры несут следующую характеристическую нагрузку.

Водоносные комплексы, предназначенные для захоронения промстоков, представлены неограниченными по простирацию пластами региональной протяженности.

Они представляют собой самостоятельные единицы, отличающиеся по основным геолого-гидрогеологическим параметрам от перекрывающих и подстилающих водоносных комплексов или водоупоров.

Характер вмещения вод в породы водоносных комплексов преимущественно трещинно-поровый.

Водоносные комплексы характеризуются фильтрационной неоднородностью. Фильтрационная макронеоднородность выражена слоистостью в вертикальном разрезе; фильтрационная микронеоднородность характерна для всего пространства водоносного комплекса (по площади и в разрезе). В целом имеет место гетерогенно-однородное строение пласта.

Для водоносных комплексов характерны повышенные пластовые температуры и давления.

Подземные воды водоносных комплексов имеют высокую суммарную минерализацию, следствием чего является значительная их вязкость и повышенная ионная сила.

Захоронение промстоков осуществляется посредством нагнетания промстоков в водоносные комплексы под давлением.

Факторами, оказывающими наиболее существенное влияние на формирование химического состава подземных вод в условиях захоронения промстоков, являются структурно-тектонические, термодинамические, региональные гидродинамические условия, скорость фильтрации. Прогнозная оценка формирования химического состава подземных вод в условиях захоронения промстоков должна основываться на учете этих факторов.

Подземное захоронение промстоков осуществляется в сложных термодинамических условиях. Особенно важен при подземном захоронении

промстоков учет изменчивости термодинамических параметров в их совокупности.

Пластовые температуры в пределах водоносных комплексов с различными условиями залегания находятся в диапазоне от единиц градусов С до 80–90° С и более, пластовые давления — до 250 атм и более; гидростатическое давление может достигать более 100 атм. Разнообразие температур и давлений влияет на растворимость слаборастворимых карбонатов кальция и магния и сульфата кальция, при уменьшении их растворимости в системе "промсток—подземная вода" эти соединения могут из смесей промстоков с подземными водами выпадать в осадок. При увеличении растворимости хорошо растворимых соединений возрастает возможность их массопереноса.

В пределах миграционных систем "промсток—порода" и "промсток — подземная вода — порода" градиент температуры вызывает теплопередачу и термодиффузию веществ. Согласно закону Ньютона, скорость теплопередачи определяется теплопроводностью фаз: $dQ = -K \frac{dT}{dt} dS$ (dQ — количество тепла, проходящее в единицу времени через единицу площади

dS ; K — теплопроводность; $\frac{dT}{dt}$ — перепад температуры в направлении, нормальном к поверхности dS). В пластовых условиях при 40° С теплопроводность доломитов (от $7,1 \cdot 10^{-3}$ до $7,6 \cdot 10^{-3}$ кал/см · с · град) несколько выше, чем у известняков (от $2,1 \cdot 10^{-3}$ до $5,0 \cdot 10^{-3}$). С увеличением температуры их теплопроводность уменьшается, причем у известняков меньше, чем у доломитов. Так, для известняков увеличение температуры от 0 до 200° С вызывает уменьшение теплопроводности на $2,9 \cdot 10^{-3}$, а для доломитов — на $4,0 \cdot 10^{-3}$ кал/см · с · град. Теплопроводность же воды значительно меньше теплопроводности пород, и в пластовых условиях при температуре около 40° С она не превышает $1,6 \cdot 10^{-3}$ кал/см · с · град.

С увеличением температуры (от 30 до 130° С) теплопроводность воды уменьшается незначительно (не более чем на $0,3 \cdot 10^{-3}$ кал/см · с · град). Несколько больше теплопроводность воды увеличивается с ростом давления: при изменении давления от 1 до 800 атм теплопроводность воды увеличивается не более чем на $0,7 \cdot 10^{-3}$ кал/см · с · град. По мере увеличения температуры и давления изменение теплопроводности воды очень незначительно увеличивается.

Насыщение пород водами значительно влияет на увеличение их теплопроводности. Так, теплопроводность сухих известняков при их пропитывании водой возрастает в несколько раз (например, с $5,0 \cdot 10^{-3}$ до $23,0 \cdot 10^{-3}$ кал/см · с · град). Таким образом, породы, обладающие большей теплопроводностью, чем вода, интенсивно передают свое тепло жидкой фазе, распространение которого по потоку незначительно из-за слабой теплопроводности воды.

Влияние теплообмена породы с подземной водой на их взаимодействие различно в зависимости от того, какой фронт — концентрационный или температурный — движется быстрее. Если скорость движения температурного фронта меньше, чем концентрационного, то на миграцию компонентов будет оказывать основное влияние разность их концентраций в фазах. При обратном соотношении скоростей движения обоих фронтов главную роль в миграции компонентов приобретают процессы термодиффузии.

Теоретически зависимость величины коэффициента диффузии от темпе-

ратуры выражается таким образом:

$$D = D_0 \cdot \exp(-E/RT),$$

где D — коэффициент диффузии при T ; T — абсолютная температура; R — газовая постоянная; E — энергия активации диффузии (величина ее для большинства жидкостей находится в пределах 3–5 ккал/моль, а для твердых тел резко увеличивается — до десятков, а иногда и более 100 ккал/моль); D_0 — предэкспоненциальный множитель или фактор частоты.

Из уравнения следует, что при увеличении температуры возрастает коэффициент диффузии.

Под действием разности температур в миграционных системах происходит перераспределение концентрации компонентов. Термодиффузионный поток растворенного вещества можно охарактеризовать уравнением

$$\vec{I}_1^T = -x_1 x_2 D_T \text{grad } T,$$

где I_1^T — термодиффузионный поток растворенного вещества; x_1 — его концентрация в мольных долях; x_2 — концентрация растворителя в мольных долях; D_T — коэффициент термодиффузии растворенного вещества. Коэффициент термодиффузии D_T является не всегда определенным и для одних компонентов одного и того же раствора будет положительным, а для других отрицательным. Диффузионные потоки, возникая вследствие различия теплового движения частиц в неравномерно нагретой системе, приводят к тому, что различающиеся по массе частицы перемещаются и в направлении градиента температуры, и в противоположном направлении, но в разных соотношениях.

Отношение
$$\frac{D_T}{D} = - \frac{1}{x_1 x_2} \frac{\text{grad } x}{\text{grad } T} = S_T.$$

Коэффициент Соре (S_T) в жидкостях имеет величину порядка 10^{-3} – 10^{-5} град. Поскольку коэффициент диффузии в свободных жидкостях имеет величину порядка 10^{-5} см²/с, то коэффициент термодиффузии в жидкостях есть величина порядка 10^{-8} – 10^{-10} см²/с·град. В растворах, насыщающих пористые среды, коэффициент термодиффузии имеет порядок 10^{-9} – 10^{-11} см²/с·град. Коэффициент Соре в растворах зависит от температуры и концентрации.

Так, для KCl раствора зависимость S_T от температуры и начальной концентрации (С моль/л) раствора следующая:

$$\text{при } t^{\circ} 15^{\circ} - C/S_T \cdot 10^{-3} = 2/0,08; 3/0,45; 4/0,86,$$

$$\text{при } t^{\circ} 25^{\circ} \text{ C} - C/S_T \cdot 10^{-3} = 1/0,35; 2/0,76; 3/1,05; 4/1,33,$$

$$\text{при } t^{\circ} 35^{\circ} \text{ C} - C/S_T \cdot 10^{-3} = 1/1,09; 2/1,40; 3/1,58; 4/1,73,$$

$$\text{при } t^{\circ} 45^{\circ} \text{ C} - C/S_T \cdot 10^{-3} = 1/1,78; 2/1,92; 3/2,03; 4/2,10.$$

Таким образом, чем больше концентрация раствора, тем больше коэффициент Соре, и, чем больше температура, тем значительнее при близкой концентрации раствора коэффициент Соре.

Стационарное распределение тепла между твердой и жидкой фазами системы достигается очень быстро, а равновесное распределение концентрации вещества — очень медленно (соответственно минуты и многие часы).

Давление оказывает основное влияние на миграцию компонентов в начальный момент, когда под большим напором происходит проникновение

промстоков в водоносный комплекс, т.е. в пределах миграционной системы "промсток — порода". Рост давления снижает величину коэффициента диффузии в жидкостях и породах. Однако это снижение очень мало: при увеличении давления на 100 атм коэффициент диффузии уменьшается в среднем на сотые или десятые доли единицы. Кроме того, градиент давления вызывает молекулярный перенос вещества и перераспределение концентраций (бародиффузию), т.е. может проявляться в системе "промсток — подземная вода — порода".

Действие градиента давления на перераспределение концентраций компонентов противоположно действию градиента температуры. Оба фактора — давление и температура — действуют одновременно.

Так как влияние пластового давления на перераспределение компонентов в системах "промсток — порода" и "промсток — подземная вода — порода" носит различный характер для твердой и жидкой фаз, на миграции компонентов оно будет сказываться там, где это влияние сильнее.

При решении задач по миграции компонентов в подземных водах путем молекулярной и конвективной диффузий, т.е. задач массопереноса, влияние величины давления будет всегда отрицательным, влияние же величины температуры — положительным. Кроме того, возможные влияния градиентов давления и температуры на миграцию компонентов по потоку в случае, когда участок исследований будет более значительным по площади и водоносный комплекс находится в различных структурных условиях, определяющих значительное разнообразие пластовых давления и температуры.

Структурно-тектонические условия оказывают влияние на миграцию компонентов в подземных водах главным образом через посредство региональных гидродинамических условий, так как региональные гидродинамические условия комплексов артезианских бассейнов практически полностью определяются структурной обстановкой и структурно-тектоническим развитием. И тем не менее можно назвать те из структурных особенностей, которые сами по себе довольно четко отражаются на миграции компонентов в подземных водах. К таким особенностям относятся: а) принадлежность участков водоносных комплексов к положительным и отрицательным структурам разных порядков и б) приуроченность участков водоносных комплексов к различным частям положительных или отрицательных структур разных порядков. Оказывается, что участки водоносных комплексов артезианских бассейнов, приуроченные к положительным складкам или же к сводовым частям положительных складок, характеризуются распространением подземных вод с относительно повышенной концентрацией гидрокарбонат-иона и сульфат-иона. В то же время эти подземные воды отличаются относительно пониженными суммарной минерализацией и концентрацией хлора, брома, бора и др. Для участков же водоносных комплексов, приуроченных к отрицательным структурам или к крыльевым частям положительных структур, характерны подземные воды с относительно пониженной концентрацией гидрокарбонат-иона и сульфат-иона, с повышенной концентрацией хлора, брома, бора и повышенной суммарной минерализацией.

Влияние структурно-тектонических условий на миграцию компонентов в подземных водах важно рассматривать также с палеотектонических позиций. Особое внимание следует при этом уделять характеру и направленности тектонических движений, которые определили во многих случаях особую гидрогеохимическую обстановку.

Региональные гидродинамические условия для водоносных комплексов артезианских бассейнов, как наиболее используемых для захоронения

промстоков, следует оценивать с позиции направления движения смесей промстоков с подземными водами.

Направление движения смесей в пределах этих водоносных комплексов, рассматриваемых для системы "промсток — подземная вода — порода", является производной геологического строения. Напорные водоносные комплексы, распространенные в пределах артезианских бассейнов различного типа, — многофазные системы со сложным и неравномерным движением вод, в ходе которого происходит перераспределение водных масс в плане и вертикальном разрезе. Перераспределение водных масс в плане происходит при передвижении смесей промстоков и подземных вод в направлении погружения водоносных комплексов. В этом же направлении изменяется суммарная минерализация смесей. Ее изменение заключается, как правило, в увеличении, что объясняется возрастанием времени протекания процессов перевода веществ в раствор из породы при удлинении пути фильтрации и поступлением в каждый более удаленный от эксплуатационной скважины участок водоносного комплекса веществ, переносимых смесями из менее удаленных участков. Возрастание времени физико-химического взаимодействия смесей с породами является следствием: а) увеличения в направлении движения объема породы, с которой взаимодействует смесь; б) уменьшения в направлении погружения водоносных комплексов скорости движения вод.

В системе "промсток — подземная вода — порода" наряду с процессами выщелачивания возможны сорбционные процессы. Однако они всегда количественно слабее, чем процессы выщелачивания. Поэтому при одновременном протекании этих разнонаправленных процессов часто по направлению движения смесей промстоков с подземными водами происходит возрастание их минерализации.

При возрастании минерализации смесей концентрация компонентов промстоков уменьшается. Это уменьшение абсолютное (за счет процессов сорбции) и относительное (за счет возрастания концентрации природных компонентов, поступающих из породы).

Скорость фильтрации подземных вод наряду с другими геолого-гидрогеологическими параметрами, обуславливающими возможность подземного захоронения промстоков, является наиболее существенным параметром, так как характеризуется многосторонностью влияния. В крупном плане скорость фильтрации определяет распространение промстоков в пространстве и во времени, значительно сказывается на кинетике физико-химических процессов и на форме зоны смешения промстоков с подземными водами и т.д.

Скорость фильтрации оказывает влияние на формирование химического состава подземных вод на обоих вышеуказанных этапах (захоронения и после захоронения). Влияние ее разнообразно; она влияет на процессы массообмена и массопереноса. В то же время ее действие практически ограничивается миграционной системой "промсток — подземная вода — порода".

Повышенные скорости фильтрации вод способствуют увеличению скорости протекания физико-химических процессов растворения и выщелачивания. В случае процессов выщелачивания пород смеси промстоков с подземными водами, обладающие повышенными скоростями фильтрации, обеспечивают отвод от границы твердой и жидкой фаз большого числа компонентов, поступающих из породы в раствор.

В случае сорбционных и ионно-обменных процессов повышенные скорости фильтрации вод ослабляют взаимодействие компонентов промстоков с породами, так как каждый объем раствора с определенными

концентрациями компонентов промстоков провзаимодействует с породой меньше время и за это время сорбированию и ионному обмену подвергнется меньшее число молекул компонентов промстока.

Учет влияния скорости фильтрации на формирование химического состава подземных вод в условиях захоронения промстоков требует изучения фильтрационного строения водоносных комплексов, их фильтрационной неоднородности.

Ниже приводится пример геолого-гидрогеологического изучения объекта предполагаемого подземного захоронения промстоков.

Изучение структурно-тектонических и региональных гидродинамических условий. Район предполагаемого захоронения промстоков приурочен к сочленению моноклиального склона платформы с предгорным прогибом. Фундамент, по данным геофизики, залегает на глубине около 12 000 м; в районе предполагаемого захоронения промстоков фундаментом образует впадину, открывающуюся на юго-восток. Через район предполагаемого захоронения промстоков протягивается зона глубинных разломов широтного простирания, а также продольных разломов, в результате чего сформирована блоковая структура. Осадочный чехол имеет унаследованное тектоническое строение; исследуемый водоносный комплекс погружается в юго-восточном направлении, где осложнен рядом мелких антиклинальных складок.

Водоносный комплекс залегает на глубинах более 1700 м. По данным термометрии, пластовая температура на глубине 1750 м около 30°С. Пластовое давление около 215 атм. Вскрытая мощность водоносного комплекса составляет 460 м. Подстилающие и перекрывающие водоносные комплексы представлены плотными и слаботрециноватыми терригенно-карбонатными породами.

Исходя из расположения величин приведенных напоров подземных вод, которые уменьшаются в водосточном и северо-восточном направлениях, подземные воды движутся с северо-запада и запада на восток и юго-восток. Области инфильтрации в рассматриваемый водоносный комплекс атмосферных осадков находятся далеко за пределами данного участка (на западе и северо-западе от него). Движение подземных вод в пределах участка сложное, что в значительной степени определяется структурными условиями. Основная сложность движения связана с наличием синклиальной складки в центральной части участка и ряда антиклинальных складок в восточной части участка предполагаемого захоронения промстоков.

Изучение литолого-геохимических условий пород. Водоносный комплекс сложен преимущественно карбонатными породами, представленными главным образом доломитами, известняками с примесями гипса, ангидрита, песчано-глинистого материала, обогащенного пиритом. Состав известняка: CaCO_3 — от 90,5 до 94,5%; MgCO_3 — от 0,5 до 9,5%; состав доломита: CaCO_3 — от 49,0 до 56,9%; MgCO_3 — от 40,0 до 46,0%. Содержание CaSO_4 в ангидритах и загипсованных доломитах 44–78%, в прочих разновидностях пород 0,03–3,3%. Железо во всех породах присутствует в количествах от 0,03 до 0,2%.

Распределение компонентов и гипотетических веществ водных вытяжек из пород водоносного комплекса в зависимости от степени минерализации сложное. Распределения кальция и сульфат-иона повторяют друг друга и находятся в прямой зависимости от минерализации; при Σ_m 31,5 мг-экв/100 г содержание кальция и сульфат-иона максимальное и достигает 20 мг-экв/100 г. Распределения хлора и натрия также сходны между собой; зависимость распределения этих ионов от минерализации прямая. Максимальны значения магния в водной вытяжке с суммарной минера-

лизацией 18,9–25,2 мг-экв/100 г. Зависимость гидрокарбонат-иона от степени минерализации прямая. Суммарная минерализация водных вытяжек находится в пределах от 6,3 до 44,3 мг-экв/100 г. Соотношение между компонентами: $SO_4 \gg Ca > Cl \approx Na > Mg > HCO_3$.

Изучение химического состава подземных вод. Подземные воды рассматриваемого водоносного комплекса хлоридные натриевые с Σ_m около 250 г/л; из микроэлементов для них характерны бром, железо, алюминий, аммоний; pH 6,0–7,0. Севернее и западнее участка предполагаемого захоронения промстоков подземные воды имеют состав ClNa п. Ca, южнее — ClNaMg. Рассмотрение формирования состава вод проведено на основе палеогидрогеохимических построений.

Палеогидрогеохимические условия рассматриваемого участка водоносного комплекса представлены преобладанием седиментационных этапов над относительно непродолжительными по времени инфильтрационными. Влияние инфильтрационных этапов из-за равнинного рельефа суши распространялось на незначительную, порядка 150–200 м, глубину, о чем свидетельствует характер распространения зон древнего карста. Для одного из периодов отмечена наибольшая концентрация вод бассейна осадконакопления: $\Sigma_m \approx 330$ г/л, состав Cln.SO₄Naп.Mg. В конце палеозойского времени произошла резкая смена условий и наступил инфильтрационный режим. В результате подземные воды водоносного комплекса на рассматриваемом участке имеют смешанный седиментационно-инфильтрационный генезис. Изучение изотопного состава вод свидетельствует об их промежуточном положении между инфильтрационными и седиментационными водами.

Сравнение химического состава вод бассейна осадконакопления, давшего начало рассматриваемому водоносному комплексу, с современными подземными водами этого комплекса показало, что современные подземные воды имеют более высокую минерализацию, содержат большие количества хлора, натрия, кальция, магния и меньше — сульфат-иона. Это обстоятельство свидетельствует о действии в геологической истории рассматриваемого водоносного комплекса многих природных факторов. По-видимому, исходные воды, т. е. воды бассейна осадконакопления, изменялись при взаимодействии с породами. В преобразовании химического состава подземных вод комплекса в геологическое время участвовали породы как непосредственно данного водоносного комплекса (водовмещающие породы), так и породы перекрывающих комплексов. Водовмещающие породы явились источником дополнительных концентраций в подземных водах кальция и магния (получены высокие коэффициенты корреляции, порядка 0,7–0,9, между кальцием и магнием вод и CaO и MgO карбонатных водовмещающих пород).

Основными процессами, приведшими к высоким содержаниям в подземных водах хлора и натрия, явились процессы поступления этих компонентов из вышележащих галогенных отложений.

Изучение фильтрационных свойств пород. Для пород исследованного водоносного комплекса характерен большой процент поглощений промышленной жидкости, особенно в интервалах 1935–2019, 2074–2075 и 2076–2083 м. Обширное проявление поглощения связано с сильной закарстованностью пород. Установлено, что большинство закарстованных зон являются следствием длительной денудации пород в периоды выхода их на дневную поверхность. При изучении фильтрационных свойств отложений по скважинам не отмечено прямой зависимости изменения пористости пород с глубиной. Карбонатные породы четко расчленяются на относительно пористые и плотные слои по хорошо дифференцированной кривой

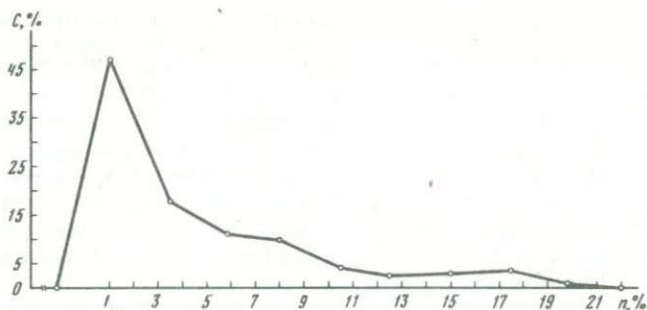


Рис. 23. Полигон распределения открытой пористости

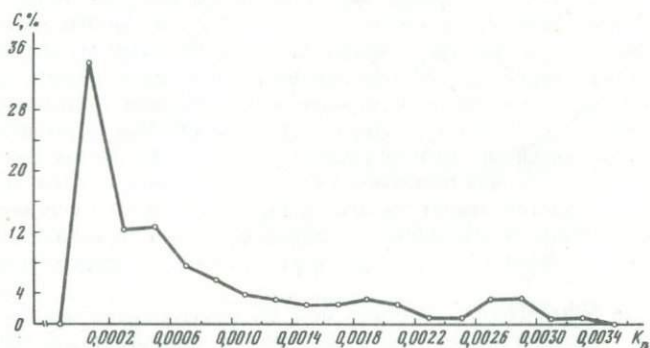


Рис. 24. Полигон распределения проницаемости

K_C стандартного потенциал-зонда. Плотным разностям отвечают максимальные величины K_C , пористым и кавернозным — минимальные.

При визуальном рассмотрении образцов разреза водоносного комплекса оказалось, что карбонатные породы имеют среднюю плотность с прослоями слабопроницаемых пород в нижней части разреза, представленной известняками и прослоями (в интервале 1925—1970 м) пород повышенной пористости и кавернозности.

Количественная оценка пористости пород состояла в определении величины коэффициента пористости (k_p) по диаграмме k_c методом радиокаротажа. Выявлено, что преобладают слои с k_p 5—10%, 15 слоев с k_p 10—15%, 3 слоя ~5%, 2 — с k_p 21,5%. В целом, по лабораторным данным, породы разреза характеризуются низкими значениями k_p (до 7,0%). В нижней части разреза k_p пород 1,5%; наивысшие значения k_p (8,5—9%) относятся к пористой зоне на глубине 1925—1970 м.

Статистическая обработка данных по пористости и коэффициенту проницаемости выявила закономерности между распределением этих величин по разрезу водоносного комплекса. Полигоны распределения открытой пористости и коэффициента проницаемости, построенные по данным интервального вариационного ряда (рис. 23, 24), и кумуляты, построенные преобразованием вариационного ряда в кумулятивный (рис. 25), показывают, что распределение пористости и коэффициента проницаемости близко к логнормальному закону. Проверка гипотезы о близости эмпирического распределения к теоретическому логнормальному, проведенная

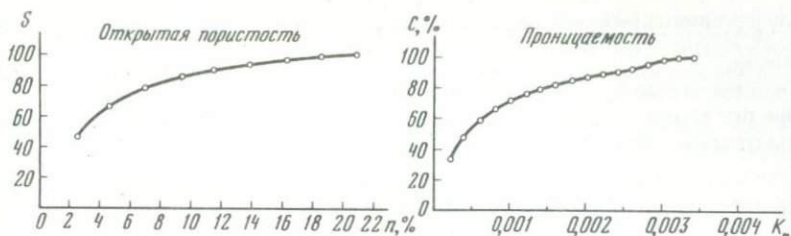


Рис. 25. Кумуляты открытой пористости и проницаемости

графически путем нанесения на вероятностную бумагу данных кумуляты (рис. 26), показала (путем близости точек к прямой на этом графике) близость эмпирического распределения к логнормальному. Это значит, что обе величины подчиняются одному и тому же закону распределения и между ними можно искать корреляционную зависимость. Для определения коэффициента корреляции вычисляется среднее значение откры-

той пористости $\bar{x} = \frac{\sum_i x_i}{n} = 4,48$ и проницаемости $\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} = 0,193$.

Среднее квадратичное отклонение: для пористости $s_x = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / n} = 4,66$, для проницаемости $s_y = \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2 / n} = 0,55$. Отсюда коэффициент корреляции

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y} = 0,735.$$

Для большого объема выборки ($n = 206$) существенность или надежность связи проверяется по формуле

$$\sigma_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{n}} = \frac{1 - 0,54}{14,35} = 0,03.$$

Условием надежности этой оценки является $r > 3\sigma_r$. В данном случае $r = 0,735 > 3,0 \cdot 0,03 = 0,09$, т. е. связь надежная и тесная, так как $|r| > 0,09$.

Гарантийные границы для полученного коэффициента корреляции $r \pm 3\sigma_r$, при $r + 0,09 = 0,825$; $r - 0,09 = 0,645$, т. е. $0,645 \leq r \leq 0,825$.

Исходя из коэффициентов корреляции составляется уравнение регрессии x на y :

$$x = r \frac{s_x}{s_y} (y - \bar{y}) + \bar{x}, \quad y = r \frac{s_y}{s_x} (x - \bar{x}) + \bar{y};$$

$$x = 0,735 \frac{4,66}{0,55} (y - 0,193) + 4,48;$$

$$x = 6,22 (y - 0,193) + 4,48;$$

$$y = 0,735 \frac{0,55}{4,66} (x - 4,48) + 0,193;$$

$$y = 0,08 (x - 4,48) + 0,193.$$

Коэффициенты $r \frac{s_x}{s_y} = b_x$; $r \frac{s_y}{s_x} = b_y$ — эмпирические коэффициенты регрессии.

В нашем случае $b_x = 6,22$; $b_y = 0,08$.

Для проверки коэффициентов регрессии оценивается среднее квадратическое отклонение величин b_x и b_y :

$$s_{b_x} = \frac{s_x}{s_y} \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 3}} = 8,47 \sqrt{0,00226} = 0,398;$$

$$s_{b_y} = \frac{s_y}{s_x} \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 3}} = 0,11 \sqrt{0,00226} = 0,005, \text{ где } r = r_{x, y}.$$

Оценка коэффициента регрессии производится путем сравнения с утроенной дисперсией, так как по формулам $b_x > 3s_{b_x}$ и $b_y > 3s_{b_y}$ в нашем случае $6,22 > 1,19$ и $0,08 > 0,015$.

Исходя из оценки коэффициентов регрессии и оценки надежности линейного коэффициента корреляции, можно сделать вывод, что зависимость между пористостью и коэффициентом проницаемости — прямая с высоким уровнем значимости.

Общий вид уравнения регрессии при $x =$ открытой пористости и $y =$ коэффициенту проницаемости

$$x = 6,22y + 3,28, \quad y = 0,08x - 0,165.$$

В исследуемом водоносном комплексе выявлен наиболее проницаемый пласт пород на глубине 1915—1970 м с пористостью 9—19% и проницаемостью ≈ 300 мд.

Изучение фильтрационных свойств пород по результатам откачек из скважин. По результатам откачек из скважин можно получить характеристику проницаемости пород сравнительно крупного участка. График зависимости $\lg t$ от Σ_M отражает процесс восстановления исходной минерализации подземной воды, нарушенной при откачке, и позволяет получить характеристику распределения в плане и разрезе пород с различной проницаемостью. В ходе откачки целесообразно пробы воды на химический анализ отбирать через интервал в 1—2 ч.

В пробах воды определяются суммарная минерализация, величина рН, содержание основных макрокомпонентов.

Обработка данных изменения суммарной минерализации воды от времени откачки по исследуемому водоносному комплексу позволила выделить два участка с различной конфигурацией кривых зависимости.

Откачки из двух разных скважин дали различный характер кривых; кривая зависимости восстановления суммарной минерализации подземной воды от времени по одной скважине более пологая, чем по другой. Следовательно, по второй скважине происходит более быстрое восстановление первичного уровня минерализации, чем по первой. И следовательно, породы ис-

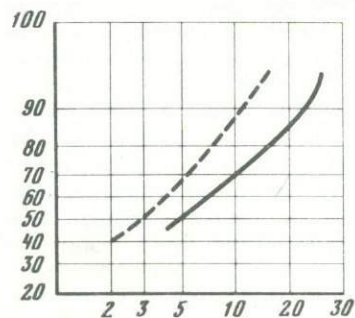


Рис. 26. Кумуляты открытой пористости и проницаемости на логнормальной бумаге

следуемого водоносного комплекса в пределах влияния откачки из первой скважины обладают лучшими фильтрационными свойствами, так как, по видимому, при лучших фильтрационных свойствах в большем радиусе породы будут захвачены при откачке и понадобится больше времени на восстановление исходной суммарной минерализации.

Изучение фильтрационных свойств пород по гидрогеохимическим данным. При анализе регионального материала взаимосвязь химического состава подземных вод с фильтрационными свойствами пород проявляется путем сравнения гидрогеохимических особенностей водоносных комплексов или отдельных их участков со степенью нарушенности пород и их проницаемостью. Так, палеогидрогеологический анализ показал, что развитие водоносных комплексов *M* и *N* было различным. Для указанных водоносных комплексов было выявлено несколько периодов континентального перерыва, но для комплекса *N* характерна большая частота и длительность последних. В связи с этим карбонатные породы этого комплекса более закарстованы. Это сказалось в том, что воды комплекса *N* хлоридные кальциево-магниевого с большим процентом Са и Mg на участках с повышенной проницаемостью карбонатных пород.

Сравнение территориального распределения вод разного химического состава с проницаемостью пород названных водоносных комплексов привело к выводу о теснейшей взаимосвязи этих показателей. Породы с повышенной проницаемостью в рассматриваемых комплексах развиты на участках, где воды имеют хлоридный натриевый состав. К породам пониженной проницаемости приурочены хлоридные с высокими концентрациями кальция и магния воды. Относительно высокая проницаемость пород в пределах развития хлоридных натриевых вод — результат растворения хлористого натрия, которым обогащена водно-растворимая часть пород. Относительно низкая проницаемость пород в пределах развития подземных вод с высоким содержанием кальция и магния — результат более затрудненного выщелачивания карбонатных минералов. Связь состава подземных вод с фильтрационными свойствами пород отмечена и для отдельных структур. Так, породы одной из антиклинальных структур имеют повышенную проницаемость, которой соответствует пониженная минерализация подземных вод. На другой антиклинальной структуре в карбонатных породах обнаружены участки с повышенными фильтрационными свойствами, которым также соответствуют подземные воды пониженной минерализации; на участках этой же структуры, где породы характеризуются пониженными фильтрационными свойствами, воды имеют повышенную минерализацию.

4.3.2. Гидрогеохимический прогноз изменения приемистости промстоков

Приемистость водоносными комплексами промстоков при подземном захоронении, как правило, не остается постоянной. Изменения в приемистости носят различный характер; она может увеличиваться, уменьшаться, неравномерно изменяться в разных частях участка захоронения.

Поэтому при решении вопроса об использовании для подземного захоронения промстоков того или иного водоносного комплекса одной из серьезных прогнозных задач является оценка изменения в пространстве и во времени его приемистости.

Основная причина изменения приемистости водоносными комплексами промстоков — физико-химические процессы; процессы выщелачивания способствуют увеличению приемистости, а процессы выпадения из промстоков и смесей твердых осадков — уменьшению приемистости.

Прогноз изменения приемистости водоносными комплексами промстоков качественно-количественный.

Основные задачи качественного прогноза: 1) изучение химического состава подземных вод и его изменений в пределах предполагаемого участка захоронения; 2) исследование оптимального состава промстоков; 3) изучение состава смесей промстоков с подземной водой; 4) установление пространственного положения смесей; 5) установление границ размещения в пределах участка захоронения миграционных систем "промсток—порода", "промсток—подземная вода", "промсток—подземная вода—порода"; 6) выявление характера физико-химических процессов в каждой из миграционных систем; 7) разграничение физико-химических процессов по характеру влияния на приемистость пластом-коллектором промстоков.

Конкретный характер физико-химических процессов, а следовательно, направленность в изменении приемистости определяются геолого-гидрогеологическими условиями районов предполагаемого захоронения промстоков. В связи с этим проводится типизация геолого-гидрогеологических условий и на ее основе дается схема качественного прогноза изменения приемистости промстоков водоносными комплексами.

Главные признаки типизации — литолого-минералогический состав пород, химический состав подземных вод, состав промстоков. Они рассматриваются для каждой из миграционных систем, формирующихся при захоронении промстоков.

При захоронении пресных и слабоминерализованных промстоков в воздушно-сухие породы приемистость пород на выбранном участке вследствие преобладания в системе "промсток—порода" процессов выщелачивания не должна уменьшаться в период захоронения.

Водовмещающие породы по особенностям литологического состава делятся на три группы: 1) терригенные песчаные; 2) терригенные глинистые; 3) карбонатные. По особенностям минералогического состава песчаные породы делятся на две подгруппы: а) силикатные; б) алюмосиликатные.

Характер физико-химических процессов в миграционных системах, развивающихся при подземном захоронении промстоков, в водоносных комплексах, сложенных песчаными алюмосиликатными и карбонатными породами, сходен (табл. 30). В миграционных системах "промсток—порода" и "промсток—подземная вода—порода" этих водоносных комплексов при любом составе промстоков и смесей промстоков с подземными водами преобладают процессы выщелачивания пород. Последние по механизму протекания различны в зависимости от характера породы. В случае песчаных алюмосиликатных пород имеют место гидролитическое углекислотное выщелачивание и процессы метасоматического замещения, в случае карбонатных — углекислотное выщелачивание и выщелачивание водами с повышенной ионной силой.

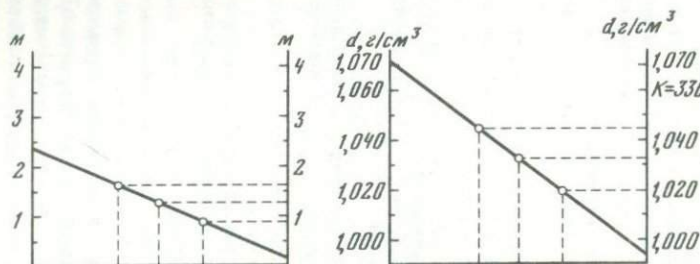
В миграционной системе "промсток—подземная вода" рассматриваемых водоносных комплексов возможны процессы образования осадка и выпадения его из смесей; эти процессы развиваются при условии, что в смесях отмечается повышенное содержание сульфат-иона, гидрокарбонат-иона, кальция (эти условия рассмотрены выше).

Таким образом, физико-химические процессы, развивающиеся при подземном захоронении промстоков в водоносные комплексы, сложенные песчаными алюмосиликатными и карбонатными породами, способствуют на одних участках увеличению, а на других уменьшению приемистости.

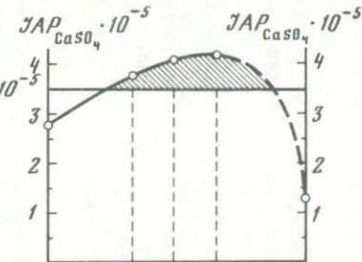
Таблица 30
Схема качественного прогноза изменения приемистости промстоков
водоносными комплексами

Водовмещающие породы	Миграционная система	Состав смесей промстоков с подземной водой	Процессы	Изменение приемистости пласта-коллектора
Песчаные силикатные	Промсток—порода	Любой	Практически отсутствуют	Очень слабое
	Промсток—подземная вода	С повышенными концентрациями SO_4 ; HCO_3 ; Ca	Образование осадка	Уменьшение приемистости
	Промсток—подземная вода—порода	Любой	Практически отсутствуют	Очень слабое
Песчаные алюмосиликатные	Промсток—порода	“	Разные виды выщелачивания	Увеличение приемистости
	Промсток—подземная вода	С повышенными концентрациями SO_4 ; HCO_3 ; Ca	Образование осадка	Уменьшение приемистости
	Промсток—подземная вода—порода	Любой	Разные виды выщелачивания	Увеличение приемистости
Глинистые	Промсток—порода	“	Сорбция;	Уменьшение приемистости
	Промсток—подземная вода	“	ионный обмен	
	Промсток—подземная вода—порода	“		
Карбонатные	Промсток—порода	“	Разные виды выщелачивания	Увеличение приемистости
	Промсток—подземная вода	С повышенными концентрациями SO_4 ; HCO_3 ; Ca	Образование осадка	Уменьшение приемистости
	Промсток—подземная вода—порода	Любой	Разные виды выщелачивания	Увеличение приемистости

В связи с последним при проектировании захоронения промстоков в рассматриваемые водоносные комплексы необходимо изучить устойчивость смесей промстоков с подземными водами по сульфату и карбонату кальция, а в случае, если выявлено пересыщение смесей по названным соединениям, установить степень пересыщения и дать характеристику изменения приемистости водоносным комплексом промстоков.



Пласт. вода 2:1 1:1 1:2 Промсток Пла. вода, 0^м 2:1 1:1 1:2 Промсток



Пла. вода 2:1 1:1 1:2 Промсток

Результаты расчета насыщенности сульфатом кальция подземной воды и ее смесей с промстоком
Пластовая вода

Σ_{M}	Cl	SO ₄	HCO ₃	Na+K	Ca	Mg	d
мг/л 108 000	66 400	1 400	1,2	31 000	7 000	2 700	1,079
мг/1000г р-ра	61 500	1 300	1,1	28 700	6 500	2 500	
моль (т)	1,93	0,015		1,39	3,180	0,114	

$$\mu = 2,28; \gamma_{\text{CaSO}_4} = 0,098; \text{JAP}_{\text{CaSO}_4} = 2,59 \cdot 10^{-5}$$

Σ_{M}	Cl	SO ₄	HCO ₃	Na+K	Ca	Mg	d
мг/л 8170	294	4912	324	2450	134	35	1,005
мг/1000г р-ра	292,5	4888	340	2438	133	34	
моль (т)	0,0083	0,0512	0,0056	0,1068	0,0033	0,0014	

$$\mu = 0,172; \gamma_{\text{CaSO}_4} = 0,27; \text{JAP}_{\text{CaSO}_4} = 1,23 \cdot 10^{-5}$$

Смесь 1:2

Σ_{M}	Cl	SO ₄	HCO ₃	Na+K	Ca	Mg	d
мг/л 43 500	23 600	3 700	165	12 700	2 300	936	1,028
мг/1000г р-ра	22 960	3 600	160	12 350	2 240	910	
моль (т)	0,674	0,039	0,0027	0,559	0,0582	0,039	

$$\mu = 0,89; \gamma_{\text{CaSO}_4} = 0,132; \text{JAP}_{\text{CaSO}_4} = 3,95 \cdot 10^{-5}$$

Смесь 2:1

Σ_{M}	Cl	SO ₄	HCO ₃	Na+K	Ca	Mg	d
мг/л 79 400	47 200	2 600	73	23 000	4 400	2 000	1,053
мг/1000г р-ра	44 800	2 470	69	21 800	4 180	1 900	
моль (т)	1,366	0,0277	0,0012	1,024	0,113	0,084	

$$\mu = 1,645; \gamma_{\text{CaSO}_4} = 0,107; \text{JAP}_{\text{CaSO}_4} = 3,58 \cdot 10^{-5}$$

Рис. 27. Пример оценки устойчивости смеси промстока с подземной водой по CaSO₄ [Витвицкий, 1978]

При подземном захоронении промстоков в водоносные комплексы, сложенные песчаными силикатными породами, миграционные системы "промсток—порода" и "промсток—подземная вода—порода" инертны в физико-химическом отношении. В системе же "промсток—подземная вода" при повышенных концентрациях сульфат-иона, гидрокарбонат-иона и кальция возможно образование осадков и на площади распространения этой системы — уменьшение свойств приемистости.

Подземное захоронение промстоков в водоносные комплексы, в сложении которых большое участие принимают глинистые разности пород, сопровождается своеобразным физико-химическим состоянием, заключающимся в преобладании во всех трех миграционных системах процессов или сорбции, или катионного обмена, или обоих одновременно. Эти процессы вызывают в той или иной степени уменьшение фильтрационных свойств пород и понижение приемистости водоносными комплексами промстоков.

Для исследования процессов смешения промстоков с подземными водами целесообразно использовать расчетный и графический методы. Эти методы позволяют получить сведения о смешении и о смесях промстоков с подземными водами с различной степенью обоснованности и детальности. Они наиболее употребимы при крупномасштабных исследованиях.

С помощью построения графиков смешения можно получить информацию о компонентном составе и суммарной минерализации смесей промстоков с подземными водами, а также прогнозную оценку устойчивости смесей по слаборастворимым соединениям.

На рис. 27 представлены график смешения слабоминерализованного промстока одного из химико-фармацевтических заводов с минерализованной подземной водой и график оценки устойчивости смесей по сульфату кальция.

Расчетным путем можно определить также суммарную минерализацию в компонентный состав смесей, но в этом случае построения проигрывают в наглядности.

Количественный прогноз изменения приемистости водоносными комплексами промстоков представляет большие трудности. Решение этой задачи возможно экспериментальным методом. Он основан на разностной схеме проницаемости пород, в которую входят данные по проницаемости, сформированной в природных условиях и в условиях эксперимента в результате физико-химического воздействия на породы промстоков и смесей их с подземными водами.

Влияние физико-химических процессов на проницаемость пород изучается посредством сравнения проницаемости проб пород (в виде кернов) по газу (а) до и после взаимодействия с ними промстоков и смесей и б) до взаимодействия с ними промстоков и смесей) с проницаемостью этих пород по промстокам и смесям в процессе опытов.

Проницаемость пород по растворам (промстокам и смесям промстоков с подземными водами) рассчитывается по формуле

$$k_{\text{пр}} = \frac{Ql\mu \cdot 1000}{F \Delta P} \text{ мД [Калинко, 1963],}$$

где Q — расход жидкости, см³/с; l — длина образца, см; μ — вязкость жидкости, спз; F — площадь образца, см²; ΔP — перепад давлений, атм.

Пример расчета проницаемости по данным, полученным в результате фильтрации смеси промстока с подземной водой вязкостью 1 спз через образец известняка длиной 3,0 см, площадью 7,1 см², при градиенте давле-

ция 40 атм и расходе смеси $0,18 \text{ см}^3/\text{с}$:

$$k_{\text{пр}} = \frac{0,18 \cdot 3,0 \cdot 10 \cdot 1000}{7,1 \cdot 40} = 146 \text{ мД.}$$

В ходе экспериментов сравниваются характер и степень миграции веществ в системах "промсток — порода" и "промсток — подземная вода — порода" с характером и степенью изменения породы; анализируются изменения гранулометрического состава проб пород с характером миграции ионов.

Эксперименты следует проводить с реальными промстоками, подземными водами и породами в термодинамических условиях, близких к пластовым.

Образцы пород могут быть представлены специально выточенным керном, или порода может быть раздроблена в зерна определенного диаметра.

Ниже излагаются результаты серии опытов по изучению изменения проницаемости известняков. Опыты были проведены для условий глубоких водоносных комплексов с промстоками нефтеперерабатывающей промышленности.

Правильность методики постановки опытов проверялась сравнением результатов анализа растворов и пород. Сравнение характера миграции веществ при взаимодействии промстоков с известняком по данным анализа состава промстоков и проб известняка до и после опыта показывает, что, как правило, миграции тех или иных веществ в промсток (или смесь) соответствует миграция тех же веществ из породы.

В результате исследований установлено, что проницаемость проб известняка (в виде зерен) по газу после взаимодействия с ними промстоков и смесей промстоков с подземной водой различного ионного состава и степени минерализации по сравнению с их проницаемостью (также по газу) до взаимодействия изменяется преимущественно в сторону увеличения.

При взаимодействии с пробами известняка промстоков и смесей промстоков с подземной водой проницаемость известняка по промстокам и смесям также, как правило, увеличивается, но по-разному сочетается с проницаемостью по газу до и после опыта. В одних случаях проницаемость по промстокам и смесям значительно превышает проницаемость проб известняка по газу до опыта, в других случаях — незначительно.

Эксперименты по фильтрации промстоков и их смесей с подземной водой через пробы раздробленного (до диаметра 1—2 мм) известняка показали, так же как и в случае фильтрации через зерна, преобладание процессов положительной миграции, что свидетельствует в целом об увеличении проницаемости карбонатных пород под влиянием промстоков и их смесей. Зафиксированная в проведенных опытах общая положительная миграция ионов сопровождалась заметным разрушением зерен породы. Разрушению во всех случаях подвергалось от 10 до 16% общего количества зерен породы. Малое во всех случаях количество тонкодисперсных частиц, образовавшееся в результате взаимодействия фильтрующейся жидкости с породой, указывает на то, что уменьшение средней дисперсности происходит в основном за счет распада крупных зерен на два и более обломка. Вероятно, подобный процесс может объясняться растворением межзернового известковистого цемента породы и в меньшей степени разложением самих зерен известняка.

Выщелачивание известняка промстоками и смесями промстоков с подземными водами хорошо видно на снимках электронного микро-

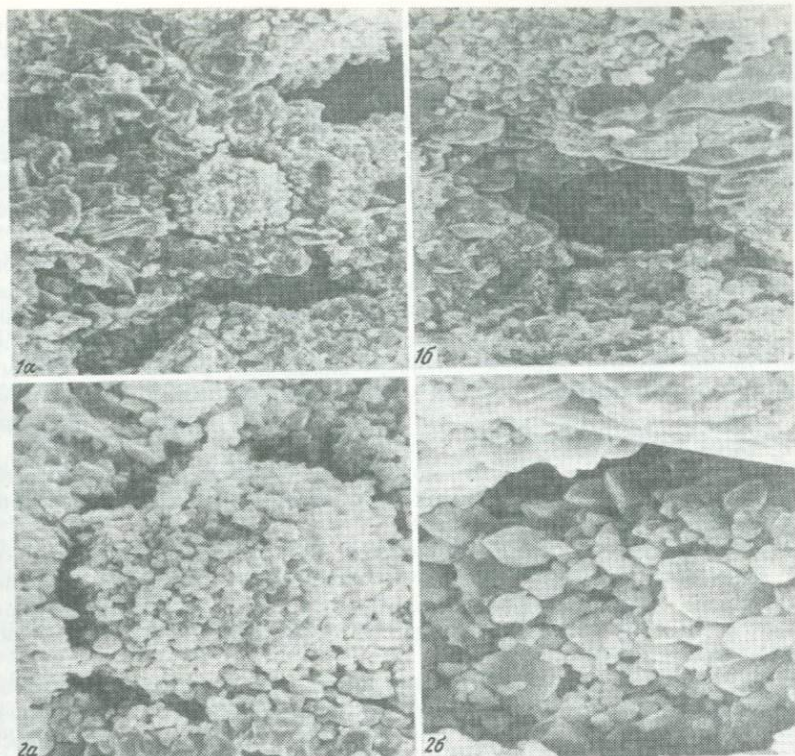


Рис. 28. Характер структурно-морфологических изменений в образцах известняка в результате физико-химического взаимодействия с промстоками и смесями промстоков с подземными водами

1а, 2а — до взаимодействия

1б, 2б — после взаимодействия

скопа, демонстрирующих увеличение размера пор после взаимодействия известняка с промстоками и смесями (рис. 28, 1б, 2б).

Как показали опыты, увеличение проницаемости карбонатных пород количественно различно, что определяется многими факторами. Наиболее существенными из них являются минералогические и структурные особенности пород и характер их естественной исходной проницаемости.

Различия в минералогическом составе карбонатных пород отражаются на проницаемости следующим образом. Наиболее сильно увеличивает проницаемость под воздействием промстоков и их смесей у доломитизированных известняков, несколько меньше — у органогенно-обломочных и сульфатизированных. Доломиты и пелитоморфные известняки почти не меняют своей проницаемости. Массивные трещиноватые доломиты, мелкокристаллические известняки, известняки со стилолитовыми швами и глинистые разновидности известняков несколько уменьшают свою проницаемость. Это явление связано, вероятно, с набуханием глинистого заполнителя трещин и стилолитовых швов.

Зависимость изменения проницаемости пород от их исходных фильтрационных свойств выражается в следующем.

В случае фильтрации промстоков и смесей промстоков с подземными

водами через известняки высокой проницаемости (ограногенные и органогенно-обломочные) изменение их исходной проницаемости незначительное. Кристаллические, органогенные, органогенно-обломочные и доломитизированные известняки, характеризующиеся средней проницаемостью, как правило, улучшают свои коллекторские свойства в 20—30 раз. Карбонатные породы малой проницаемости заметнее всего изменяют ее при фильтрации промстоков и смесей промстоков с подземной водой. Так, образцы с первоначальной проницаемостью 0,003 и 0,01 в ряде случаев увеличивают ее в 1000—3000 раз.

Изменения проницаемости пород под влиянием физико-химического воздействия на них промстоков и смесей промстоков с подземными водами в различном удалении от эксплуатационной скважины количественно различны. В пределах системы "промсток—порода", расположенной непосредственно вблизи эксплуатационной скважины, вследствие того что промстоки в большинстве случаев менее минерализованы по сравнению с их смесями, а следовательно, более агрессивны, изменения проницаемости пород более существенны, чем в пределах системы "промсток — подземная вода — порода". Следовательно, интенсивность увеличения проницаемости пород за счет физико-химических процессов в направлении фильтрационного потока снижается.

На участке развития миграционной системы "промсток — подземная вода" возможны процессы сорбции и образования осадка, приводящие к ухудшению исходной проницаемости пород. По экспериментальным данным, вследствие названных процессов проницаемость керновых проб известняка уменьшалась на 12—16%.

Таким образом, зональное распределение на участках захоронения промстоков миграционных систем, характеризующихся своеобразием физико-химических процессов, обуславливает пластовую зональность распространения пород с различным характером и степенью изменения проницаемости (приемистости).

Всего формируются три зоны: а) ближайшая к эксплуатационной скважине зона со значительной степенью увеличения проницаемости (приемистости) пород; б) промежуточная зона, в пределах которой проницаемость (приемистость) пород уменьшается; в) удаленная от эксплуатационной скважины зона, характеризующаяся незначительной степенью увеличения проницаемости (приемистости) пород.

Формирование названных зон приводит к пространственной макронеоднородности относительно изменения проницаемости пород, а следовательно, изменения приемистости водоносным комплексом промстоков в ходе их подземного захоронения.

На пластовую пространственную макронеоднородность накладывается неоднородность по вертикальному разрезу, а также микронеоднородность, являющаяся следствием фильтрационной неоднородности пород. Все это сильно усложняет количественный прогноз изменения приемистости водоносными комплексами промстоков на участке захоронения в целом.

4.3.3. Прогнозное гидрогеохимическое районирование

Прогнозное гидрогеохимическое районирование проводится путем составления карты гидрогеохимического районирования по условиям подземного захоронения промстоков. Карта составляется на основе данных о состоянии естественной гидрогеохимической обстановки водоносных комплексов, о фильтрационных свойствах пород водоносных комплексов, о физико-химических процессах взаимодействия промстоков

с подземными водами и породами, о влиянии на системы "промсток — порода", "промсток — подземная вода" и "промсток — подземная вода — порода" природных факторов. К природным факторам относятся давление, температура, литолого-геохимические свойства пород. Отсюда признаками прогнозного гидрогеохимического районирования в целом являются региональные гидродинамические условия, фильтрационные (коллекторские) свойства пород, химический состав подземных вод, химический состав смесей промстоков с подземными водами, физико-химические процессы.

Прогнозное гидрогеохимическое районирование делится на две категории: а) районирование крупных территорий; б) районирование участков захоронения промстоков.

Прогнозное гидрогеохимическое районирование крупных территорий, как правило, проводится для серии водоносных комплексов, слагающих вертикальный разрез данной территории.

Таксономическими единицами районирования крупных территорий являются район и подрайоны разных порядков.

Прогнозное районирование крупных территорий проводится поэтапно. Выделяются три этапа: 1) поиск водоносного комплекса-коллектора; 2) прогноз характера и степени изменения приемистости водоносным комплексом промстоков; 3) прогноз распространения промстоков.

На этапе поиска водоносного комплекса-коллектора на основании изучения фильтрационных свойств пород систематизируется вертикальный разрез исследуемой территории и выделяются части разреза, сложенные водоносными комплексами с хорошими коллекторскими свойствами. По числу таких водоносных комплексов и характеру их размещения в вертикальном разрезе в пределах исследуемой территории выделяются районы. Исходя из гидродинамической обстановки, каждый район характеризуется по условиям изолированности и по интенсивности передвижения подземных вод.

На данном этапе прогнозного районирования признаками районирования являются региональная гидродинамическая обстановка и фильтрационные свойства пород.

На втором этапе районирования крупных территорий прогноз изменения приемистости водоносными комплексами промстоков проводится путем предсказания процесса выпадения из смеси промстоков с подземными водами в осадок слаборастворимых карбоната кальция и сульфата кальция. Особое внимание этому процессу уделяется вследствие того, что этот процесс может при значительной интенсивности протекания вызвать существенное снижение приемистости промстоков. На основании расчета для каждого водоносного комплекса-коллектора устанавливается степень насыщения смесей промстоков с подземными водами карбонатом и сульфатом кальция и выделяются водоносные комплексы или участки водоносных комплексов, в пределах которых предполагается перенасыщение смесей по карбонату и сульфату кальция. Эти водоносные комплексы или их участки исключаются из числа рекомендуемых для захоронения промстоков. На основании деления водоносных комплексов на благоприятные и неблагоприятные по характеру изменения приемистости в пределах районов выделяются подрайоны первого порядка. Признаками прогнозного районирования данного этапа являются химический состав смесей промстоков с подземными водами и процесс образования в смесях осадка.

На третьем этапе районированием по условиям распространения промстоков предусматривается решение прогнозных задач по определению

расстояния и времени, в течение которых концентрация компонентов промстоков достигнет допустимых норм или будет ниже их. Признаки районирования на этом этапе — сорбционные физико-химические процессы (адсорбция, ионный обмен), процессы выщелачивания и их соотношение. На основании различий в результате расчета выделяются подрайоны второго порядка.

Прогнозное гидрогеохимическое районирование участков захоронения промстоков проводится практически всегда для территории распространения одного водоносного комплекса. При этом заведомо известно, что он является комплексом-коллектором.

Таксономические единицы районирования территории распространения одного водоносного комплекса: провинция, область, подобласть 1-го порядка, подобласть 2-го порядка. Провинция — наиболее крупная единица; она выделяется по химическому составу подземных вод. Таким образом провинция — это участок земной коры в пределах водоносного комплекса, характеризующийся единством химического состава подземных вод. В качестве основы для выделения провинций следует использовать гидрогеохимическую карту с информацией по элементарному химическому составу и рН подземной воды.

В соподчинении с провинцией находится более мелкая таксономическая единица районирования — область. Область — это участок водоносного комплекса в пределах провинции, характеризующийся единством химического состава промстоков, т.е. участок распространения одного промстока или группы одновременно захороняемых промстоков. Промстоки оцениваются качественно и количественно, т.е. по ионному составу, рН, степени минерализации. В пределах каждой отдельной области устанавливается предполагаемый состав смесей промстоков с подземной водой и выявляется состояние насыщения смесей по карбонату и сульфату кальция, обуславливающих характер изменения приемистости водоносным комплексом промстоков. Подобласть 1-го порядка выделяется в соответствии с литолого-геохимической характеристикой водовмещающих пород, т.е. это участок водоносного комплекса в пределах области, характеризующийся литолого-геохимической однородностью. В зависимости от состава промстоков, состава смесей промстоков и подземных вод, образующих с породами данного литологического облика определенные геохимические совокупности, в пределах подобластей 1-го порядка должны развиваться своеобразные физико-химические процессы между жидкой и твердой фазами, а также в жидкой фазе. Характер процессов будет определять характер изменения в фильтрационных и емкостных свойствах пород. Как правило, растворение и выщелачивание способствуют увеличению этих свойств, образование осадка и сорбция — уменьшению; ионный обмен слабо влияет на эти свойства.

В самом общем виде можно выделить несколько литолого-геохимических разновидностей пород со своеобразным влиянием на физико-химические процессы в ходе захоронения промстоков: а) песчаные кварцевые; б) песчаные полевошпатовые; в) глинистые; г) известняковые; д) доломитовые. Песчаные кварцевые породы довольно инертны относительно физико-химического взаимодействия с промстоками и смесями любого состава промстоков и подземных вод; песчаные полевошпатовые породы подвергаются активному воздействию слабоминерализованных и углекислых промстоков и смесей; карбонатные породы испытывают воздействие слабоминерализованных, а также сильноминерализованных промстоков и смесей с высокими концентрациями хлористого натрия. При прочих рав-

ных условиях интенсивность протекания процессов разложения известняков больше, чем доломитов.

Подобласти 2-го порядка выделяются на основании фильтрационной неоднородности пород. Каждый участок земной коры в пределах водоносного комплекса, к которому приурочена подобласть 1-го порядка, характеризующийся конкретным видом фильтрационной неоднородности или фильтрационной однородностью пород, составляет подобласть 2-го порядка. Учет фильтрационных свойств пород необходим в связи с тем, что эти свойства в значительной степени определяют количественное проявление физико-химического взаимодействия промстоков и смесей промстоков и подземных вод с породами. При условии одинакового времени существования систем "промсток-порода" и "промсток — подземная вода — порода" взаимодействие растворов любого состава с породами значительно больше на участках с большей проницаемостью пород. В связи с этим на карте прогнозного районирования выделяются участки водоносных комплексов с различным изменением фильтрационных и емкостных свойств, определяемых различной естественной проницаемостью пород. Количественные градации проницаемости пород для показа на карте следует устанавливать в каждом конкретном случае отдельно в зависимости от особенностей среды и на основании статистических примеров разделения на совокупности.

Оценка изменения фильтрационных и емкостных свойств водоносных комплексов под влиянием физико-химических процессов, развивающихся при захоронении промстоков, в целом с помощью карты районирования дается постадийно. На первой стадии оценивается влияние осадкообразования на фильтрационные и емкостные свойства пород, на второй — характер и интенсивность физико-химических процессов взаимодействия промстоков и их смесей с подземной водой с породами, на третьей — вносятся коррективы в выявленные закономерности на основании естественной проницаемости пород.

В итоге на карте прогнозного гидрогеохимического районирования отдельного водоносного комплекса выделяется несколько категорий провинций, областей и подобластей с разной степенью благоприятности захоронения промстоков.

При прогножном гидрогеохимическом районировании в целях подземного захоронения промстоков часто требуется составление серии рабочих карт: а) распространения промстоков с различным составом, суммарной минерализацией и степенью биологической вредности; б) распространения подземных вод с различными ионным составом и суммарной минерализацией; в) распространения смесей промстоков с подземными водами, имеющими различный химический состав; г) насыщенности смесей промстоков с подземными водами сульфатами и карбонатами кальция; д) литологического состава пород; е) региональных гидродинамических условий; ж) фильтрационной неоднородности пород.

При прогножном гидрогеохимическом районировании в целях подземного захоронения промстоков необходимы многообразная работа по выявлению характера и направленности физико-химических процессов, установление преобладающего типа (типов) процессов в пределах каждой из миграционных систем, учет многочисленных природных факторов, существенно сказывающихся на характере и интенсивности физико-химических процессов.

Гидрогеохимические аспекты исследований в инженерно-геологических целях

5.1. Общие положения

Многосторонняя хозяйственная деятельность человека часто вызывает такие изменения в химическом составе подземных вод, которые в разной мере отражаются на инженерно-геологических процессах и явлениях. Изучение взаимосвязей и взаимообусловленностей между гидрогеохимическими условиями и инженерно-геологическими процессами и явлениями должно послужить основой прогнозирования наступления их изменений. Большое значение исследование изменения качества подземных вод имеет для разного рода строительства и разработки полезных ископаемых.

Гидрогеохимическая проблематика, связанная с инженерно-геологической деятельностью человека, широка и разнообразна; она характеризуется значительным диапазоном и разными сферами. Наиболее существенны следующие ее аспекты: 1) исследование формирования специфических гидрогеохимических условий, отрицательно сказывающихся на инженерно-геологической деятельности человека; 2) изучение изменений инженерно-геологических свойств пород под влиянием физико-химических процессов.

Каждый из названных выше аспектов включает целый ряд задач. Крупными задачами в области исследования формирования специфических гидрогеохимических условий, отрицательно сказывающихся на инженерно-геологической деятельности человека, являются исследования формирования жестких подземных и агрессивных подземных вод.

В области изучения изменений инженерно-геологических свойств пород под влиянием физико-химических процессов, обычно протекающих в системах, образуемых подземной водой с породами, газами и другими средами, главные задачи следующие: исследование физико-химических процессов, способствующих изменению прочностных свойств пород; изучение физико-химических процессов, способствующих формированию пород с высокими прочностными свойствами; исследование физико-химических суффозионно-карстовых процессов. Изменение прочностных свойств пород в то же время является изменением их фильтрационных свойств. Формирование определенных геохимических типов в миграционных системах "подземная вода — порода" и "подземная вода — порода — газ" сопровождается уменьшением прочностных и увеличением фильтрационных свойств пород или же увеличением прочностных и уменьшением фильтрационных свойств пород.

Подземные воды в том и другом случае различны по химическому составу, формируются в разных геолого-гидрогеологических обстановках при участии различных физико-химических процессов.

Большое значение имеют исследования изменений инженерно-геологических процессов и явлений под воздействием загрязненных подземных вод. Они также включают ряд задач, решение которых позволяет выявлять изменения жесткости, агрессивности подземных вод и т.д. в случае их загрязнения. Например, загрязнение подземных вод бытовыми отходами особенно часто сопровождается повышением концентрации отдельных компонентов, придающих водам свойства жесткости и агрессивности. Поэтому в районах возможного загрязнения подземных вод следует пользоваться специальными сортами бетона. Часто повышается углекислотная агрессивность загрязненных подземных вод вблизи водохранилищ вслед-

стве увеличения содержания в них углекислого газа, поступающего при растворении и выщелачивании почвенного и подпочвенного слоев, богатых органикой.

Изменения в инженерно-геологических свойствах пород часто вызываются взаимодействием загрязненных вод с породами по типу ионного обмена. Последний типичен для глинистых разностей, но возможен и в пределах песчаных разностей с добавками глинистых частиц. В результате ионного обмена частично изменяются структура глинистых пород и в связи с этим их прочностные свойства; последние могут уменьшаться. Другой эффект вызывает взаимодействие загрязненных подземных вод с глинистыми породами по типу сорбционно-адсорбционных процессов. Адсорбция глинистыми частицами тех или иных компонентов, по-видимому, способствует увеличению прочностных свойств пород. Выяснено также, что в случае глинистых пород в ходе загрязнения быстро увеличивается минерализация поровых вод, что значительно влияет на инженерно-геологические свойства таких пород.

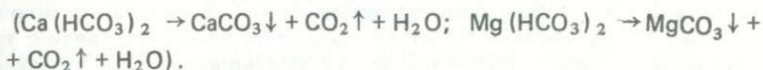
Явления изменения химического состава подземных вод и последующее неблагоприятное их воздействие на породы очень существенны в районах отвалов, а также хранилищ жидких и твердых отходов. Загрязненные подземные воды во многих случаях оказываются пересыщенными по карбонатам и сульфатам кальция, что приводит к выпадению из них этих соединений. Очень интересна с инженерно-геологических позиций вторичная цементация осушенных рыхлых грунтов.

Изменения инженерно-геологических процессов и явлений под влиянием гидрогеохимических условий в значительной степени зависят от диапазона и интенсивности деятельности человека и обязательно от естественных геолого-гидрогеологических условий. При прогнозной оценке изменений инженерно-геологических процессов и явлений эти категории параметров должны учитываться в качестве главных факторов. Оценка геолого-гидрогеологических факторов включает литологический и минералогический составы отложений, структурно-тектонические условия, региональную гидродинамическую обстановку, скорости фильтрации подземных вод, характеристику геохимических свойств подземных вод, гидрогеохимический режим и т.д. Важно при прогнозе дать оценку времени протекания физико-химических процессов, влияющих на инженерно-геологические процессы и явления. При этом очень опасны медленно протекающие процессы, приводящие к серьезным последствиям. При количественном прогнозе инженерно-геологических изменений под влиянием гидрогеохимических условий следует стремиться к уточнению расчетов посредством детализации и конкретизации учета в расчетах параметров, отражающих характер физико-химических процессов.

5.2. Формирование геохимических свойств подземных вод, отрицательно влияющих на инженерно-геологические сооружения

Формирование жестких подземных вод. Как отмечалось выше, жесткость подземных вод оценивается по сумме кальция и магния. Нежесткими являются подземные воды с минимальным содержанием кальция и магния, установленным ГОСТом. Жесткие воды классифицируются на умеренно жесткие (6,0–10,0 мг-экв/л Ca + Mg), жесткие (10,0–15,0), очень жесткие (более 15,0). Жесткие подземные воды при использовании их для питания паровых котлов вызывают образование накипи, которая

снижает теплопроводность стенок котлов и способствует снижению экономичности работы котлов. Анионный состав жестких подземных вод различен; воды могут характеризоваться, исходя из анионного состава, гидрокарбонатным и сульфатным типами жесткости. При карбонатном типе жесткости во время кипячения из воды удаляется углекислый газ и выпадает в осадок карбонат кальция или магния:



Образуется карбонатная накипь.

Сульфатная накипь, возникающая при сульфатном типе жесткости, образуется при повышенном содержании в воде сульфат-иона и кальция. В случае кипячения вследствие уменьшения объема воды концентрация этих ионов увеличивается, содержание сульфата кальция при концентрации около 2 г/л достигает насыщения и это соединение выпадает в твердом виде из воды. При карбонатной жесткости кальций и магний приходятся на гидрокарбонат- и карбонат-ионы, при сульфатной — кальций приходится на сульфат-ион. Нижний предел суммарной минерализации жестких подземных вод 0,5 г/л; воды кальциево-магниевого состава с меньшей минерализацией, как правило, не жесткие.

Воды с карбонатной и сульфатной жесткостью различаются по степени жесткости, по суммарной минерализации и анионному составу и по условиям формирования.

Подземные воды с карбонатной жесткостью характеризуются величиной жесткости, равной 6–15 мг-экв/л, редко более; их суммарная минерализация менее 1 г/л, но более 0,5 г/л. Эти воды принадлежат к гидрокарбонатному типу, к классу $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$; они образуют геохимические группы, характеризующиеся гидрокарбонатным с повышенным содержанием сульфат-иона кальциево-магниевого и гидрокарбонатно-сульфатным кальциево-магниевым составом.

Воды с карбонатной жесткостью формируются в зоне интенсивного водообмена в водоносных комплексах, сложенных карбонатными или терригенными четвертичными и дочетвертичными отложениями с широким распространением кальциевых алюмосиликатных минералов, посредством процессов углекислотного выщелачивания этих отложений. Эти воды имеют строгую приуроченность к областям дренирования или же к областям транзита, но соседствующим с областями дренирования. Именно при таких региональных гидродинамических условиях данные подземные воды часто имеют минерализацию, превышающую 0,5 г/л. В областях инфильтрации атмосферных осадков и на значительной части областей транзита воды терригенных и карбонатных отложений обычно менее минерализованы.

На формирование рассматриваемых жестких вод значительное влияние оказывают скорости фильтрации. Малые скорости фильтрации, способствуя формированию вод с относительно большей суммарной минерализацией (2.3.2), обуславливают тем самым формирование жестких подземных вод.

В подземных водах с сульфатной жесткостью степень жесткости часто превышает 15 мг-экв/л. Их суммарная минерализация свыше 1 г/л, иногда достигает 2 г/л и более. Воды относятся к сульфатному типу, классу $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$. При суммарной минерализации около 1 г/л они имеют сульфатно-гидрокарбонатный кальциево-магниевого или сульфатный с повышенным содержанием гидрокарбонат-иона кальциево-маг-

ниевый состав. При суммарной минерализации 2 г/л и более их состав сульфатный кальциевый.

Воды с сульфатной жесткостью формируются в водоносных комплексах, сложенных либо терригенными отложениями с сульфидной минерализацией, либо сульфатными отложениями. В первом случае их формирование протекает в условиях пониженной гидродинамической активности в пределах отрицательных форм рельефа и геологических структур, во втором формирование жестких вод практически не зависит от рельефа и структур.

Пониженная гидродинамическая активность подземных вод в первом случае, выраженная через малые скорости фильтрации, способствует тому, что жесткие воды распространяются в зоне интенсивного водообмена на значительные площади, занимая области дренирования, а также большую часть областей транзита. В случае, когда подземные воды имеют большие скорости фильтрации, они приобретают свойства жесткости вблизи и непосредственно в областях дренирования.

В целом размеры площадей распространения подземных вод с сульфатной жесткостью, приуроченных к терригенным отложениям, больше, чем с карбонатной. Подземные воды с сульфатной жесткостью, приуроченные к терригенным отложениям, характеризуются большей частотой встречаемости, чем воды с карбонатной жесткостью:

Формирование агрессивных подземных вод. Виды наиболее широко распространенной агрессивности: магниальная, сульфатная, общекислотная, углекислотная, карбонатная, кремнекислотная.

Магниальная агрессивность возникает при содержании в подземных водах магния в количествах, превышающих 1 г/л. Она вызывает поступление из бетона CaO в обмен на $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

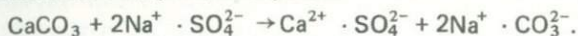
Подземные воды с магниальной агрессивностью чаще всего формируются при сернокислотном выщелачивании доломитизированных, а также мергельных отложений. Только в этих случаях возможно формирование значительных концентраций магния в подземных водах. Последнее обусловливается высокой растворимостью соединений сульфата магния, образующихся в водах при сернокислотном выщелачивании доломитовых и мергельных отложений.

Для протекания процесса сернокислотного выщелачивания доломитовых и мергельных отложений необходимо, чтобы в подземной воде содержалась серная кислота. Она формируется при окислении серы или полисульфидных минералов, присутствующих обычно в песчано-глинистых отложениях. Следовательно, подземные воды с магниальной агрессивностью должны быть приурочены к сложному разрезу, состоящему из терригенно-карбонатных пород (терригенных — с полисульфидными минералами, карбонатных — доломитизированных или мергелистых).

Сульфатная агрессивность подземных вод выражается в том, что сульфат-ион воды, образуя с кальцием бетона сульфат кальция, более растворимый по сравнению с известью бетона, способствует разрушению бетона. Подземные воды с сульфатной агрессивностью должны содержать повышенные концентрации сульфат-иона, что возможно, если сульфат-ион присутствует в воде в форме хорошо растворимых соединений сульфат натрия или магния. Сульфатное соединение магния практически не встречается в пресных и слабоминерализованных водах в повышенных концентрациях. Сульфатное же соединение натрия распространено в подземных водах с минерализацией, превышающей 2 г/л. Эти подземные воды приурочены к сульфатным отложениям; их состав сульфатный натриевый.

Процесс разрушения бетона водами с сульфатной агрессивностью пред-

ставляется следующим образом



Сульфатная агрессивность подземных вод для сульфатнестойких бетонов оценивается по содержанию сульфат-иона в воде, составляющему более 250 мг/л. Это нижние пределы сульфатной агрессивности, так как для других сортов бетона содержания сульфат-иона в воде должны быть более высокими (например, для бетонов на портландцементе — 250—500, 501—1000 мг/л и более при содержании хлора соответственно 3000, 3001—5000 и более 5000 мг/л).

Подземные воды с сульфатной агрессивностью, как правило, приурочены к сульфатным отложениям; их пространственное положение определяется распространенностью этих отложений и не зависит от региональных гидродинамических и других природных факторов. Это слабоминерализованные воды сульфатного типа. В класс $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$ входят группы $\text{SO}_4\text{HCO}_3\text{Ca}$, $\text{SO}_4\text{п. HCO}_3\text{Ca}$, SO_4Ca вод, в класс $\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$ — группы SO_4Na , $\text{SO}_4\text{п. ClNa}$, SO_4ClNa вод. Суммарная минерализация вод класса $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$ — менее или около 2 г/л, класса $\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$ — 2 г/л. Воды класса $\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$ взаимодействуют в отличие от вод класса $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$ с засоленными сульфатными отложениями. Увеличение суммарной минерализации вод происходит одновременно с возрастанием в водах содержания сульфат-иона (класс $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl}$) и увеличением наряду с сульфат-ионом хлора (класс $\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{HCO}_3$) в целом в направлении движения подземных вод.

Подземные воды с агрессивностями общекислотной (при pH 5,2), углекислотной (CO_2 свободной 15 мг/л), карбонатной (HCO_3 0,2 мг-экв/л) распространены, как правило, в областях преимущественной инфильтрации атмосферных осадков в водоносные комплексы зоны интенсивного водообмена.

На общие условия формирования подземных вод с общекислотной, углекислотной и карбонатной агрессивностями накладываются частные, но довольно существенные условия, определяющие разнообразие рассматриваемых вод по суммарной минерализации и ионному составу.

Воды с карбонатной агрессивностью делятся на две группы. К первой относятся воды с суммарной минерализацией менее 0,1 г/л. Это гидрокарбонатные воды с любым катионным составом. При суммарной минерализации менее 0,1 г/л и гидрокарбонатном составе подземные воды, как правило, содержат гидрокарбонат-ион в количестве менее 0,2 мг-экв/л. В этом случае воды значительно недонасыщены по карбонату кальция и магния, что и определяет их выщелачивающее агрессивное воздействие на бетонные сооружения. Они формируются при взаимодействии с изверженными и метаморфическими породами и корами их выветривания в пределах горно-складчатых областей и кристаллических массивов, а также при взаимодействии с карбонатными, четвертичными континентальными и дочетвертичными морскими отложениями в областях инфильтрационного питания на платформах.

Во вторую группу подземных вод с карбонатной агрессивностью входят воды с суммарной минерализацией от 0,1 до 0,5 г/л гидрокарбонатно-хлоридного или гидрокарбонатно-сульфатного состава, в которых содержание гидрокарбонат-иона, как и в водах первой группы, вследствие добавок других анионов мало. Воды этой группы формируются обычно на платформах при взаимодействии с терригенными морскими четвертичными отложениями (гидрокарбонатно-хлоридные) и с терригенными отложениями, обогащенными сульфидами металлов (гидрокарбонатно-сульфатные).

Рассматриваемые подземные воды распространены преимущественно в областях транзита или в областях питания атмосферными осадками (чаще в областях транзита, так как в областях питания воды терригенных отложений редко содержат высокий процент хлора или сульфат-иона).

Общекислотная агрессивность свойственна кислым подземным водам, формирующимся под влиянием факторов, определяющих низкие значения рН.

Наиболее распространенными факторами являются повышенные концентрации в водах уголекислоты (биогеохимического и другого происхождения) и органических кислот. Поэтому подземные воды с общекислотной агрессивностью являются агрессивными и по уголекислоте.

Уголекислотная агрессивность, свидетельствующая о том, что в подземных водах содержатся повышенные концентрации свободной уголекислоты, обуславливает под воздействием последней интенсификацию процесса уголекислотного выщелачивания цементов.

Уголекислотная агрессивность, а следовательно, и сопровождающая ее общекислотная развиваются в подземных водах независимо от их приуроченности к типам отложений и определяются факторами, способствующими формированию повышенных концентраций уголекислоты. К последним относятся биогеохимический фактор (широкое развитие болотной и почвенной органики) и значительные фильтрационные свойства водовмещающих отложений и отложений зоны аэрации. Суммарная минерализация подземных вод, обладающих уголекислотной агрессивностью, характеризуется большим диапазоном — от $< 0,1$ до $> 0,5$ г/л; разнообразен анионно-катионный состав.

Общекислотная агрессивность, помимо формирования за счет свободной уголекислоты, может формироваться при окислении сульфидных минералов. Окисление моносльфидных минералов обычно вызывает незначительное понижение величины рН и слабую общекислотную агрессивность. При окислении полисульфидных минералов в водах формируется еще и серная кислота, что значительно снижает величину рН. В этом случае формируется сильно выраженная общекислотная агрессивность.

Кремнекислотная агрессивность свойственна подземным водам, содержащим хорошо растворимые соединения кремниевой кислоты (например, кремнекислый натрий). Такие воды взаимодействуют с бетоном с образованием слаборастворимых силикатов кальция и магния. Подземные воды с кремнекислотной агрессивностью формируются при взаимодействии с силикатными песчано-глинистыми породами. При их выщелачивании в воду поступает кремниевая кислота. Натрий в воде появляется за счет катионно-обменных реакций с глинистыми породами; кальций и магний, являясь двухвалентными, относительно легко уходят из подземной воды в породу в обмен на натрий. Последний, как элемент одновалентный, легче мигрирует из породы в воду.

Величина кремнекислотной агрессивности обычно небольшая, что обуславливается слабой выщелачиваемостью подземными водами силикатных пород.

В целом ряде случаев подземные воды обладают одновременно несколькими неблагоприятными свойствами. Так, подземные воды с сульфатной жесткостью часто обладают и сульфатной агрессивностью; воды с уголекислотной агрессивностью обладают и общекислотной агрессивностью, а в ряде случаев и сернокислотной. В то же время подземные воды с различными видами жесткости, агрессивности довольно индивидуальны в геохимическом и геолого-гидрогеологическом отношении, что позволяет прогнозировать распространение подземных вод со специфическими,

неблагоприятными для инженерно-геологической деятельности человека свойствами.

Как правило, преобладающее число водоносных комплексов зоны интенсивного водообмена характеризуются значительной гидрогеохимической неоднородностью, выраженной через пространственную в плане и разрезе изменчивость величин суммарной минерализации подземных вод, гидрогеохимических типов, классов, групп.

Тот или иной конкретный характер гидрогеохимической неоднородности обусловлен в главных чертах структурными и гидродинамическими обстановками, литолого-минералогическими особенностями пород, орографическими особенностями, а в итоге — своеобразием комплекса физико-химических процессов, свойственных данной обстановке.

В соответствии с различными процессами формирования химического состава подземных вод и со спецификой проявления гидрогеохимической неоднородности среди подземных вод выделяются гидрогеохимические типы, характеризующиеся различной практической значимостью в связи с инженерно-геологической деятельностью человека.

Практическую значимость подземных вод условно можно выразить через следующие категории: 1) воды весьма благоприятные; 2) благоприятные; 3) малоблагоприятные; 4) неблагоприятные.

Подземные воды, относимые к категории весьма благоприятных, должны быть мягкими и неагрессивными. Воды этой категории встречаются очень редко. Их формирование возможно при гидролитическом углекислотном выщелачивании полевых шпатов в условиях умеренного инфильтрационного питания. Они обладают малой (от 0,1 до 0,5 г/л) суммарной минерализацией, гидрокарбонатным натриевым составом, нейтральной или щелочной реакцией.

Благоприятными подземные воды считаются в том случае, когда они слабжесткие и ограниченно агрессивные (последнее должно относиться как к видам агрессивности, так и к степени того или иного вида агрессивности).

Подземные воды малоблагоприятные являются или слабжесткими, или жесткими и частично агрессивными; агрессивность должна проявляться по отдельным видам, а не по комплексу видов одновременно.

К неблагоприятным относятся сильножесткие подземные воды, обладающие при этом несколькими видами агрессивности. Подземные воды, относящиеся к категории неблагоприятных, обычно имеют повышенную суммарную минерализацию.

Отсюда общее прогнозирование территорий по условиям распространения подземных вод, в той или иной степени благоприятных для инженерно-геологических целей, предусматривает прогноз распространения прежде всего пресных подземных вод.

Поисковыми признаками на пресные подземные воды в пределах зоны активного водообмена являются литологические показатели, региональные гидродинамические условия, фильтрационная неоднородность. Пресные подземные воды чаще всего приурочены к водоносным комплексам, сложенным терригенными и карбонатными отложениями, изверженными и метаморфическими породами. В пределах водоносных комплексов, сложенных карбонатно-сульфатными и сульфатными отложениями, пресные подземные воды формируются на участках преимущественной инфильтрации атмосферных осадков или значительного участия последних в подземном стоке. Наиболее пресные подземные

воды приурочены к участкам, где породы обладают повышенными фильтрационными свойствами.

Поисковыми признаками на жесткие и агрессивные подземные воды среди пресных вод являются суммарная минерализация и ионный состав. Прогноз на такие подземные воды основывается на генетических особенностях геохимических типов подземных вод. Генетические геохимические типы подземных вод в каждом регионе свои, присущие геолого-гидрогеологическому строению данного региона. Основой для их установления являются рассмотренные выше положения по формированию жестких и агрессивных подземных вод.

При установлении генетических гидрогеохимических типов особое место отводится породам. В целях оценки гидрогеохимических закономерностей отдельных водоносных комплексов и вертикального разреза зоны интенсивного водообмена в сложных ситуациях составляются карты литолого-геохимического районирования каждого исследуемого водоносного комплекса и районирования территории, в разрезе которой изучается сразу серия водоносных комплексов.

При составлении карт литолого-геохимического районирования используются данные скважин. Разрез каждой скважины обрабатывается в целях установления преобладающих и подчиненных литологических разностей пород и геохимических их особенностей. Основанием для этого служит процентное соотношение между литологическими разностями пород. В характеристику пород разреза скважины включаются разности, составляющие более 20% из 100. В качестве преобладающих выделяются разности пород с большим процентным содержанием. Разности пород, содержание которых составляет от 10 до 20%, входят в характеристику пород разреза скважины в качестве примесей. На литологических картах отдельных водоносных комплексов выделены провинции и области. Провинция — более крупная единица; области входят в провинции, т.е. провинции иногда состоят из нескольких областей. В провинции объединены участки водоносного комплекса, породы которых в литологическом отношении однородны, но могут отличаться по второстепенным породам или по примесям. В области выделяются участки водоносного комплекса в пределах провинции, характеризующиеся своеобразием литологии пород, являющихся второстепенными разностями или примесями.

Независимо от процентного содержания на карте литолого-геохимического районирования обязательно отражаются наличие сульфатных отложений или засульфаченность любых других литологических разностей, присутствие карбонатного цемента в терригенных отложениях, наличие сульфидов.

По соотношению в вертикальном разрезе отложений с определенной литолого-геохимической характеристикой по основным отложениям выделяются типовые разрезы, характеризующие районы. В пределах районов по своеобразию второстепенных разностей отложений и примесей выделяются подрайоны.

На основании рассмотрения всех особенностей вертикального разреза любой исследуемой территории посредством сочетания водоносных комплексов зоны интенсивного водообмена выделяются гидрогеохимические районы с типовыми гидрогеохимическими генетическими условиями и практической значимостью подземных вод.

5.3. Влияние гидрогеохимических процессов на инженерно-геологические свойства пород

Изменение инженерно-геологических свойств пород в целом ряде случаев в значительной степени определяется физико-химическими процессами воздействия на них подземных вод. Разные процессы вызывают различный характер изменений. Выделяются: а) процессы растворения и выщелачивания, способствующие уменьшению прочностных свойств пород; б) процессы сорбции, образования и выпадения из подземных вод слаборастворимых соединений, способствующие увеличению прочностных свойств пород; в) процессы ионного обмена, слабо влияющие на прочностные свойства пород.

Растворению как процессу обратимому, протекающему без участия газовой фазы, подвержены мономинеральные сульфатные и галогенные породы. При их растворении часто формируется сульфатный и галогенный карст. Растворение галогенных пород вследствие высокой растворимости не лимитируется гидрогеологическими условиями. Оно в относительно равной мере возможно в пределах грунтового и напорных, занимающих различное геолого-структурное положение водоносных комплексов. Локальность же распространения галогенных отложений определяет относительную изолированность площадей с возможным развитием галогенного карста.

Гидрогеохимическими признаками сульфатного карста являются сульфатно-гидрокарбонатный и сульфатный кальциевый состав подземных вод при суммарной минерализации 1–2 г/л, сульфатный натриевый и сульфатно-хлоридный натриевый состав подземных вод при суммарной минерализации от 2 до 3–5 г/л и более.

Выщелачиванию подземными водами как процессу необратимому, протекающему с участием газовой фазы, подвержены карбонатные и разновозрастные и разного генезиса терригенные отложения. Выщелачивание углекислотное, окисление сернокислотное. При углекислотном выщелачивании карбонатных отложений осуществляется перевод катионов кальция и магния и частично анионов (гидрокарбонат-иона) в подземную воду, терригенных — обмен иона водорода подземной воды на катионы (кальций или натрий) алюмосиликатных минералов.

Углекислотное выщелачивание карбонатных отложений вследствие слабой растворимости образующих их минералов успешно протекает в условиях значительного атмосферного питания подземных вод, т.е. в условиях грунтового водоносного комплекса, а также слабо-напорных водоносных комплексов зоны интенсивного водообмена. В этих гидродинамических условиях система "подземная вода — карбонатная порода" физико-химически неравновесна. Особенно интенсивное выщелачивание следует ожидать в областях инфильтрации в водоносные комплексы атмосферных осадков. Там подземные воды наименее минерализованы и наиболее неравновесны по отношению к карбонатным породам. Углекислотное выщелачивание карбонатных пород протекает в условиях, когда суммарная минерализация подземных вод ниже 0,5–0,8 г/л. При достижении водами этой минерализации наступает состояние их насыщения карбонатом кальция и магния; углекислотный процесс прекращается, а избыток карбоната кальция и магния выпадает из воды в твердом виде. Подземные воды гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава с суммарной минерализацией, превышающей 0,5–0,8 г/л, распространены в областях разгрузки и близких к ним областях транзита.

Выщелачивание карбонатных пород в зоне интенсивного водообмена нередко протекает по типу сернокислотного. Как было показано ранее, сернокислотное выщелачивание карбонатных пород является следствием окисления сульфидных минералов терригенных отложений, в ходе которого в воде образуется серная кислота. Одновременное проявление процессов окисления и сернокислотного выщелачивания часто отмечается на участках, где породы представлены терригенно-карбонатными разностями. В результате сернокислотного выщелачивания карбонатных пород главным соединением подземной воды становится сульфат кальция, растворимость которого около 2 г/л, поэтому сернокислотное выщелачивание возможно при более высокой минерализации подземных вод. В погруженных частях артезианских бассейнов возможно выщелачивание карбонатных пород подземными водами с повышенной ионной силой. В этом случае взаимодействие между подземными водами и карбонатной породой протекает по схеме $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{Na}^+ \text{Cl}^- \rightarrow \text{Ca}^{2+} \cdot 2 \text{Cl}^- + 2 \text{Na}^+ \text{CO}_3^{2-}$. Данная система ввиду значительной растворимости образующихся соединений неравновесна, что определяет протекание процесса слева направо. Таким образом, выщелачивание карбонатных пород под влиянием подземных вод возможно практически в любых гидрогеологических условиях.

Экспериментальными исследованиями установлена и уточнена зависимость степени воздействия подземных вод на карбонатные и сульфатные породы от минерализации и ионного состава вод, от содержания в водах углекислого газа, от времени протекания физико-химических процессов.

Влияние суммарной минерализации и ионного состава подземных вод на интенсивность их воздействия на карбонатные породы выражается следующим образом: под воздействием пресных подземных вод любого ионного состава, слабоминерализованных сульфатного и минерализованных хлоридного натриевого состава происходит выщелачивание карбонатных отложений. В системе "пресная подземная вода — карбонатная порода" действует процесс углекислотного выщелачивания, в системе "слабоминерализованная вода сульфатного состава — карбонатная порода" — процесс сернокислотного выщелачивания, в системе "минерализованная вода хлоридного натриевого состава — карбонатная порода" — выщелачивание раствором с повышенной ионной силой.

Повышенные концентрации в воде углекислого газа увеличивают степень углекислотного выщелачивания карбонатных пород (рис. 29). Экспериментальное исследование проявления процессов выщелачивания карбонатных пород водами различного состава в разнообразных термодинамических условиях показало, что фактор времени играет существенную роль в преобразовании прочностных свойств карбонатных пород.

Каждый опыт в отдельности проводился с одним раствором и с одной пробой породы при одних и тех же значениях давления и температуры посредством фильтрации раствора через породу. Было проведено несколько десятков опытов, и все они показали, что время фильтрации растворов через карбонатные породы, представленные известняком и доломитом, в большей или меньшей степени сказывается на характере и степени взаимодействия растворов с породами. Степень влияния данного фактора на разные ионы различна.

В опытах по взаимодействию известняка с дистиллированной водой без углекислоты и с дистиллированной водой с различным содержанием

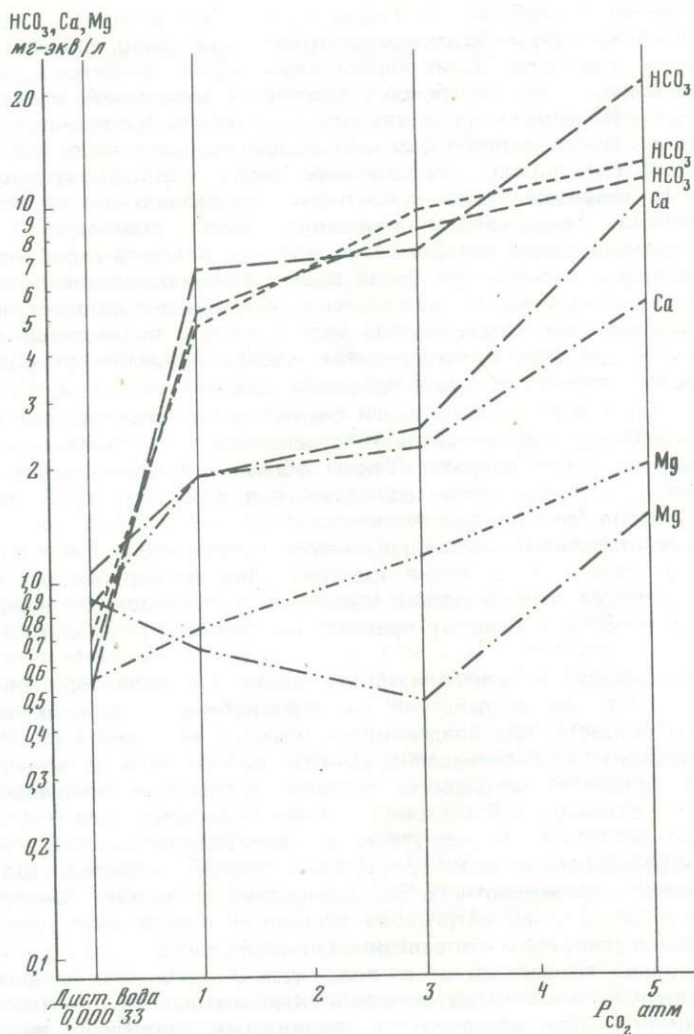


Рис. 29. Влияние концентрации CO_2 на степень углекислотного выщелачивания карбонатных пород

углекислоты в воду из известняка мигрируют Na, Ca, Mg, Cl, SO_4 , HCO_3 , т.е. все основные ионы. Анализ результатов опытов показал, что степень миграции всех ионов в сумме и каждого в отдельности в течение 30 мин значительно выше, чем в течение 10 мин (рис. 30).

В опытах по взаимодействию с карбонатными породами хлоридных натриевых растворов с различной суммарной минерализацией (9,0; 15; 50 г/л) из пород в растворы мигрируют Ca, Mg, HCO_3 , SO_4 . С увеличением времени взаимодействия до 30 мин количества мигрирующих в растворы Ca, Mg, SO_4 , HCO_3 возрастают в несколько раз.

В опытах с сульфатно-хлоридным натриевым (SO_4ClNa) раствором (при суммарной минерализации 5,0 г/л) из карбонатной породы в раствор в течение 25 мин поступило (мг-экв/л): HCO_3 — 20,0; Mg — 2,53; в течение

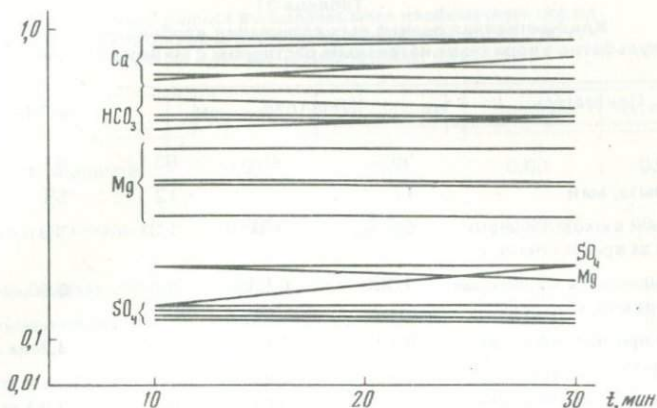


Рис. 30. Влияние времени взаимодействия растворов с карбонатными породами на интенсивность процессов выщелачивания

31 мин: HCO_3 — 22,4; Mg — 18,0. В опытах с сульфатно-хлоридным натриевым (SO_4ClNa) раствором с минерализацией 15 г/л с увеличением времени опыта от 10 до 30 мин количество Ca , Mg , HCO_3 (иногда SO_4), переходящих в растворы из пород, повышалось в несколько раз. При взаимодействии в течение 10 и 30 мин хлоридно-сульфатного натриевого раствора с суммарной минерализацией 5,0 г/л с известняком и доломитизированным известняком в раствор переходили из пород Ca , Mg , Cl . Миграция этих ионов в раствор увеличивалась с возрастанием времени опыта. Увеличение миграции Ca и Mg незначительное, немногим более 1 мг-экв/л, Cl — до 10 мг-экв/л. Таким образом, фактор времени сказывается на различных физико-химических процессах взаимодействия подземных вод с карбонатными породами.

При взаимодействии с карбонатными породами растворов хлоридного натриевого состава развивается и с увеличением длительности опыта усиливается процесс их выщелачивания растворами с повышенной ионной силой; действие этого процесса касается карбонатных минералов, а также сульфатных примесей. С возрастанием времени взаимодействия увеличивается переход в воду Ca , Mg , HCO_3 , SO_4 .

Взаимодействие с карбонатными породами растворов, содержащих наряду с другими анионами также сульфат-ион, протекает по типу сернокислотного выщелачивания, вследствие которого в воду переходят Ca , Mg , HCO_3 .

В целом экспериментальное исследование взаимодействия подземных вод с карбонатными породами позволило установить зависимость степени выщелачивания этих отложений от различных факторов, а также оценить выщелачивание количественно.

Количественная оценка выщелачивания известняков и доломитов проводилась путем расчета суммарного выхода из них веществ в граммах за время опыта из всего объема пробы породы, из 1 г пробы породы, а также в процентах выхода веществ из всего объема пробы породы за время опыта. Расчет выхода веществ в воду из 1 г породы вызван необходимостью сравнения результатов разных опытов, в которых вес проб пород не был абсолютно одинаков; он колебался от 50 до 80 г (табл. 31—33).

Суммарное количество веществ, поступавших во время опыта из породы в воду, определялось по данным анализа фильтратов, исходя из положения,

Таблица 31

Количественная оценка выщелачивания карбонатных пород сульфатно-хлоридным натриевым раствором с минерализацией 5,0 г/л

Показатель	Известняк		Доломит		
Вес, г	56	58	63	63	62
Время опыта, мин	12	25	12	56	47
Суммарный выход веществ из пробы за время опыта, г	0,072	0,31	1,31	1,8	2,96
Выход веществ из 1 г породы за время опыта, г	0,0013	0,005	0,02	0,03	0,05
Выход из пробы породы за время опыта, %	0,13	0,6	2,1	3,2	4,8
Суммарный выход веществ из пробы за 1 мин, г	0,006	0,01	0,1	0,03	0,06
Выход веществ из 100 г породы за 1 мин, г	0,01	0,017	0,018	0,16	0,09

Таблица 32

Количественная оценка выщелачивания известняка сульфатно-хлоридным натриевым раствором с минерализацией 50 г/л

Показатель	Вес, г					
	50	50	50	68	75	80
Время опыта, мин	120	120	120	114	30	15
Суммарный выход веществ из пробы за время опыта, г	1,3	0,5	0,22	0,7	0,68	0,97
Выход веществ из 1 г породы за время опыта, г	0,026	0,01	0,004	0,01	0,009	0,01
Выход из пробы породы за время опыта, %	2,6	1,0	0,44	1,03	0,8	1,2
Суммарный выход веществ из пробы за 1 мин, г	0,01	0,004	0,002	0,006	0,02	0,06
Выход веществ из 100 г породы за 1 мин, г	0,02	0,008	0,004	0,007	0,03	0,075

что в изолированной двухфазной системе "порода – вода" изменения в составе одной фазы (в породе) соответствуют качественно обратным и количественно равным изменениям другой фазы. Количественные изменения в составе породы, происшедшие при взаимодействии с водой, были получены как разность между результатом химического анализа фильтрата и исходного (до опыта) раствора.

Процентный выход веществ из породы в воду в ходе эксперимента определялся по формуле $x = \frac{n \cdot 100}{m}$, где n – суммарный выход веществ (в г) из пробы породы; m – вес пробы породы, г.

Таблица 33

Количественная оценка выщелачивания карбонатных пород хлоридным натриевым раствором с минерализацией 150 г/л ($\tau = 30$ мин, вес пробы породы 50 г)

Показатель	Известняк	Известняк	Доломит	Доломит
Суммарный выход веществ из пробы, г	0,01	0,07	0,03	0,02
Выход веществ из 1 г породы, г	0,002	0,001	0,0006	0,0004
Выход из пробы породы, %	0,2	0,14	0,06	0,04
Суммарный выход веществ из пробы за 1 мин, г	0,003	0,0025	0,001	0,0007
Выход веществ из 100 г породы за 1 мин, г	0,006	0,005	0,002	0,0014

В результате оказалось, что из 1 г карбонатной породы за время от 12 до 120 мин в 1 л раствора разного ионного состава с суммарной минерализацией переходит от 0,0004 до 0,05 г веществ, что составляет от 0,04 до 4,8% от веса проб пород (см. табл. 31–33).

Об интенсивности выщелачивания карбонатных пород растворами разных ионного состава и минерализации можно судить на основании сравнения величины выхода веществ из 100 г породы за 1 мин.

Интенсивность выщелачивания известняка и доломита сульфатно-хлоридным натриевым раствором уменьшается примерно на порядок с возрастанием суммарной минерализации. Она еще меньше со стороны сильно-минерализованного хлоридного натриевого раствора.

При выщелачивании этих пород сульфатно-хлоридным натриевым раствором с минерализацией 5,0 г/л выход из 1 г породы веществ за 1 мин составил 0,01–0,16 г/л, с минерализацией 50,0 г/л – 0,004–9,075 г/л, при выщелачивании пород высокоминерализованным хлоридным натриевым раствором – 0,0014–0,006 г/л.

Влияние физико-химических процессов на прочностные свойства пород изучалось через проницаемость пород.

Экспериментальные исследования показали, что существует тесная взаимосвязь между проницаемостью, прочностными свойствами пород и степенью и характером физико-химического воздействия на них вод. При однородных литологических и фильтрационных свойствах пород степень и характер воздействия на них вод определяются главным образом химическим составом воды, давлением, температурой, а также временем взаимодействия породы с водой. В случае фильтрационной неоднородности пород последняя существенно сказывается на характере физико-химических процессов в системе "раствор–порода"; непостоянство фильтрационных свойств пород определяет качественное и количественное разнообразие миграции веществ. В то же время под влиянием физико-химических процессов изменяются проницаемость и прочностные свойства породы.

Эксперименты проводились на образцах известняка, доломита, ангидрита с ненарушенной структурой (керном) и на образцах раздробленных пород. Пористость проб пород в кернах 3–13%, в зернистых образцах 30–40%; диаметр зерен 0,5–1,0 и 1,0–2,0 мм. Установлено, что разность диаметров зерен на характер и интенсивность миграции компонентов

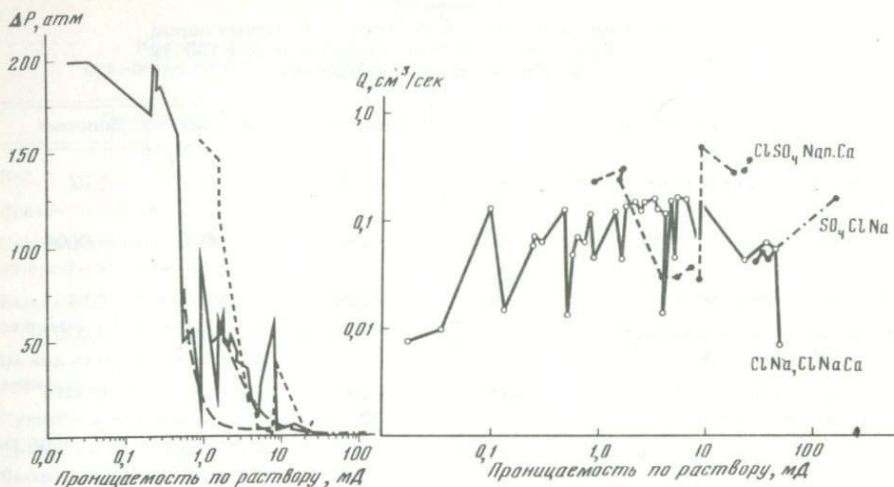


Рис. 31. Изменение проницаемости карбонатных пород по растворам в связи с изменением градиента давления
Объяснения см. в тексте

Рис. 32. Изменение проницаемости карбонатных пород по растворам в связи с расходом

не влияет. Проницаемость образцов пород-кернах изменялась от долей до 490 мД. Растворы имели состав: $\text{CO}_3\text{SO}_4\text{Na}$, $\Sigma_M = 4,5$; $\text{ClSO}_4\text{Na п. Ca}$, $\Sigma_M = 4,5$; SO_4ClNa , $\Sigma_M = 5,0$; ClNa , $\Sigma_M = 175$ г/л.

Опыты проведены в условиях атмосферного и повышенных давлений (гидростатического — 200 атм, геостатического — 300 атм), при температурах 20, 40, 60° С. Резкая контрастность давления и температуры должна была обеспечить в условиях малой длительности экспериментов их результативность.

Во всех опытах наблюдались обратная связь проницаемости по растворам с градиентом давления (рис. 31) и слабо выраженная прямая связь проницаемости с расходом раствора (рис. 32).

В результате опытов установлено, что проницаемость по растворам для пород с большей исходной пористостью выше, чем для пород с меньшей пористостью. Породам с исходной пористостью до 10% свойственна проницаемость по ClNa раствору от сотых долей до 1,5 мД; для пород с исходной пористостью до 13% характерна проницаемость по $\text{ClSO}_4\text{п. Ca}$ и ClSO_4Na растворам в интервале 1,0–30 мД, с пористостью 20–25% — в интервале 30–40 мД.

Проницаемость пород по газу в результате их взаимодействия с растворами чаще всего увеличивается. Распределение частот логарифмов проницаемости пород по газу до опытов было равномерным, после опытов сдвинуто в сторону увеличения проницаемости (рис. 33). Увеличение проницаемости пород в ходе опытов свидетельствует о том, что взаимодействие растворов с породами протекает по типу выщелачивания и растворения и эти процессы существенно уменьшают прочностные свойства карбонатных и сульфатных пород. Газовая проницаемость пород изменялась в разных опытах в 8, 10, 20, 30, 40, 100, 1300, 4000 раз. Установлено, что, чем больше газовая проницаемость породы до опыта, тем она значи-

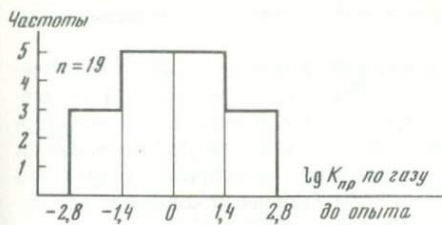
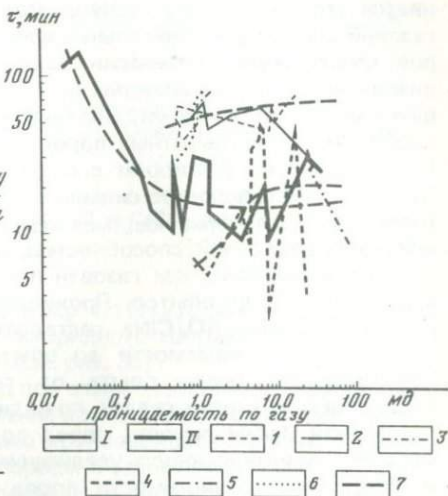
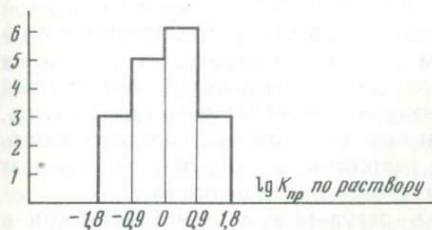
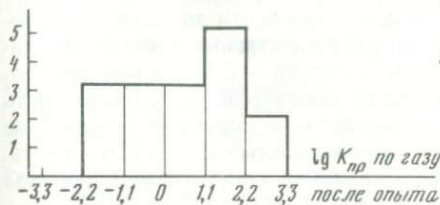


Рис. 33. Полигоны распределения частот $\lg K_{пр}$

Рис. 34. Изменение проницаемости карбонатных пород по растворам в связи с длительностью опыта

I — циркуляция; II — фильтрация; растворы: 1 — $\text{CO}_2\text{SO}_4\text{Na}$; 2 — ClNa ; 3 — SO_4ClNa ; 4 — ClSO_4Na п. Ca; 5 — ClNaCa ; 6 — ClCaNa ; 7 — средняя



тельнее после опыта. Такая закономерность вполне логична, так как все опыты проводились в одинаковых условиях относительно объема породы и времени взаимодействия воды с породой.

На изменение проницаемости пород по газу влияет состав растворов и методика проведения опытов. Так, в опытах по циркуляции через известняк растворов ClNa и SO_4ClNa состава изменение проницаемости носит линейный характер и является значительным; в опытах по фильтрации ClNa раствора изменение проницаемости слабое (рис. 34). Влияние состава растворов на изменение проницаемости пород по газу выражается в том, что более минерализованные хлоридные натриевые растворы вызывают менее значительное увеличение их проницаемости, а следовательно, менее значительное уменьшение прочностных свойств. Более существенное изменение проницаемости пород в опытах по типу циркуляции через них растворов является результатом более длительного взаимодействия единицы объема раствора с породой, нежели в опытах по типу фильтрации. В случае опыта по типу фильтрации единица объема раствора, например 200 мл, один раз фильтровалась через породу и анализировалась. В случае опыта по типу циркуляции этот объем раствора фильтровался через породу несколько раз. В природе взаимодействие подземных вод с породами осуществляется по типу циркуляции с той разницей по сравнению с опытами, что один объем воды в направлении потока взаимодействует с новыми порциями породы.

Характер взаимосвязи проницаемости карбонатных и сульфатных пород по растворам с проницаемостью по газу в разных опытах несколько разли-

чен, но в общем виде имеется тенденция к возрастанию проницаемости по растворам относительно газовой.

Проницаемость по растворам увеличивается в соответствии с увеличением газовой проницаемости: чем больше газовая (исходная) проницаемость, тем больше проницаемость по раствору. На фоне этой закономерности, исходя из соотношения изменения проницаемости по растворам и газовой проницаемости пород, выделяются две категории результатов опытов: а) проницаемость пород по растворам больше исходной газовой; б) проницаемость пород по растворам меньше исходной газовой. Объясняется это тем, что на проницаемость пород по растворам в отличие от газовой влияют дополнительные факторы, и в частности вязкость растворов. Опыты первой категории ставились преимущественно с менее минерализованными, менее вязкими растворами, а второй — с более минерализованными, более вязкими. Влияние вязкости растворов на проницаемость карбонатных и сульфатных пород выявляется также сравнением проницаемости пород по растворам с газовой проницаемостью до и после опыта. Проницаемость пород по сильноминерализованным хлоридным натриевым растворам, характеризующимся вследствие значительной вязкости пониженной фильтрационной способностью, отличается от газовой проницаемости до опытов меньше, чем газовая проницаемость после опытов от газовой проницаемости до опытов. Проницаемость пород по слабоминерализованным $\text{CO}_3\text{SO}_4\text{Na}$, SO_4ClNa растворам с меньшей вязкостью отличается от газовой проницаемости до опытов более существенно, чем газовая проницаемость после опыта от газовой проницаемости до опытов. С влиянием вязкости связан, по-видимому, и тот факт, что интенсивность увеличения проницаемости пород по растворам в ходе опытов в целом меньше, чем интенсивность увеличения газовой проницаемости.

Изменение проницаемости пород в результате их взаимодействия с растворами свидетельствует об активных процессах в системе "раствор—порода". Подтверждается это тем, что при взаимодействии растворов с породами определенному изменению проницаемости пород соответствует конкретный характер миграции компонентов. В целом в системе "раствор—порода" характер миграции компонентов и характер изменения проницаемости пород взаимообусловлены. Так, увеличению проницаемости соответствует миграция из карбонатных и сульфатных пород в растворы CaCO_3 , MgCO_3 , CaSO_4 (рис. 35, 36).

Зависимость количества выходящих из единицы веса породы в единицу времени веществ от проницаемости породы по газу для разных веществ неодинакова. Она описывается для MgCO_3 в водах сульфатно-хлоридного натриевого и хлоридного натриевого состава при проницаемости $0,02 \leq x \leq 12$ (см. рис. 35) уравнением $f(x) = 0,15 \exp(\ln(4,66)x)$ (x — проницаемость по газу); для CaCO_3 в водах того же состава при $0,02 \leq x \leq 0,5$ — уравнением $f(x) = 0,0045 \exp(\ln(3,8)x)$, а при $0,5 \leq x \leq 12$ — уравнением $f(x) = 0,003 \exp(\ln(333)x)$; для CaSO_4 в водах хлоридного натриевого состава при $0,02 \leq x \leq 1$ — уравнением $f(x) = 0,15 \exp(\ln(2)x)$ (при проницаемости $1 \leq x \leq 10$ зависимости не наблюдается).

Зависимость количества переходящих в воду из единицы веса породы в единицу времени веществ от проницаемости породы по растворам описывается следующими уравнениями: для CaCO_3 в водах сульфатно-хлоридного натриевого и хлоридного натриевого состава при проницаемости по этим растворам $0,01 \leq x \leq 0,2$ — уравнением $f(x) = 0,002 \exp(\ln(500)x)$; при проницаемости $0,2 \leq x \leq 10$ — уравнением $f(x) = 0,02 \exp(\ln(3)x)$; для CaSO_4 в водах хлоридного натриевого состава при проницаемости

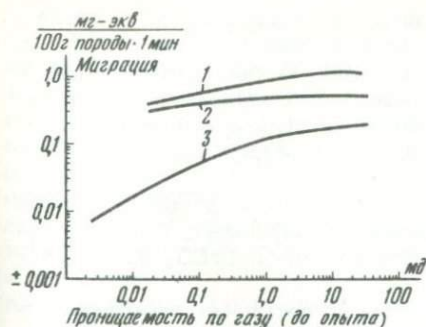


Рис. 35. Взаимосвязь миграции веществ и проницаемости по газу
 1 — $MgCO_3$ в водах $ClNa$ и SO_4ClNa состава; 2 — $CaSO_4$ в водах $ClNa$ состава;
 3 — $CaCO_3$ в водах $ClNa$ и SO_4ClNa состава



Рис. 36. Взаимосвязь миграции веществ и проницаемости по растворам
 1 — $MgCO_3$ в водах $ClNa$ и SO_4ClNa состава; 2 — $CaCO_3$ в водах $ClNa$ состава;
 3 — $CaCO_3$ в водах $ClNa$ и SO_4ClNa состава

$0,02 \leq x \leq 1,0$ — уравнением $f(x) = 0,1 \exp(\ln(2)x)$; для $MgCO_3$ в водах сульфатно-хлоридного натриевого и хлоридного натриевого состава при $1 \leq x \leq 12$ зависимость не обнаружена (см. рис. 36).

На изменение проницаемости пород при взаимодействии их с растворами влияет время взаимодействия. Увеличение времени взаимодействия породы с растворами способствует увеличению проницаемости породы. Характер зависимости между проницаемостью породы и временем ее взаимодействия с раствором сложный, что обуславливается разнообразием миграции веществ в зависимости от состава растворов и конкретных величин исходной проницаемости образца породы.

Так, в опытах с преимущественной миграцией слаборастворимых веществ из пород в растворы с возрастанием времени взаимодействия проницаемость пород по растворам увеличивается.

Зависимость увеличения проницаемости пород от времени взаимодействия их с растворами описывается для растворов CO_3SO_4Na , $ClCaNa$, $ClNaCa$, $ClNa$ состава при проницаемости $0,3 \leq x \leq 100$ уравнением $f(x) = 48 l^{\ln(1,4)x}$, для раствора SO_4ClNa состава при проницаемости $1 \leq x \leq 7$ — уравнением $f(x) = l^{(1,24)x}$, для раствора $ClNa$ состава при проницаемости $0,01 \leq x \leq 10$ — слабо согласуется с линейной.

Большое влияние на изменение проницаемости пород оказывают антропогенные факторы, в частности агрессивность загрязненных подземных вод. Особенно способствует развитию карбонатного карста увеличение углекислотной агрессивности подземных вод в целом ряде случаев антропогенного влияния. Так, например, подъем уровня грунтовых вод в районах водохранилищ при наличии карбонатных, сульфатных и галогенных отложений усиливает развитие карста.

При оценке степени карстообразования следует уделять значительное внимание палеогеологическому методу, исследуя диапазон изменчивости гидравлических уровней воды совместно с изменением гидрогеохимических параметров.

Изменения в свойствах жесткости, агрессивности подземных вод могут происходить под влиянием связанной воды.

Экспериментальные исследования по изучению изменения состава гра-

витационных вод под воздействием связанной воды позволяют сделать вывод о том, что имеет место граничное пластовое давление в 500 атм, отделяющее водоносные комплексы верхних частей земной коры с гравитационной подземной водой от нижележащих водоносных комплексов, в которых к гравитационной воде примешивается связанная вода.

Ниже приводится пример эксперимента, иллюстрирующий это положение.

В эксперименте участвовали пробы известняка и доломита, состав которых изменялся в следующих пределах: известняка: CaCO_3 91,0—97,0%, MgCO_3 1,0—9,0%, CaSO_4 0,5—0,8%; доломита: CaCO_3 53,2—56,4%, MgCO_3 — 43,0—44,4%, CaSO_4 0,1—1,9%.

Перед опытами пробы пород растирались до состояния тонкозернистого порошка, увлажнялись дистиллированной водой до верхнего предела пластичности. Вес увлажненной породы, изготовленной для опытов, составлял 63,9—96,7 г.

Отжатые объемы растворов, замеренные микропипеткой с точностью до 0,01 мл, помещались в мерные колбы на 100 мл, доводились до метки бидистиллированной водой, и в них определялось содержание натрия, калия, кальция, магния, хлора, карбонат- и гидрокарбонат-ионов, сульфат-иона, а также pH и $\Sigma_{\text{м}}$.

Состав отжатых растворов сопоставлялся с составом подземных вод и водных вытяжек из пород.

Опыты проводили при ступенчато изменяемых давлениях. Необходимость проведения опытов при трех ступенях давления вызвана стремлением исследовать как состав поровых гравитационных вод, так и состав связанной воды. Конкретно давление составляло 100, 400, 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 7000 атм.

Минерализация вод, отжатых при давлении 100 атм, составила 8,9 г/л, 400 атм — 6,0 г/л; ионный состав — соответственно $\text{SO}_4\text{Clп. HCO}_3\text{CaNa}$ и $\text{HCO}_3\text{Clп. SO}_4\text{CaNaп. К}$. Минерализация вод, отжатых из доломита при давлении 500 атм, изменялась в пределах 10,8—58,1 г/л, из известняка — 36,4 г/л. Состав отжатых растворов из доломита ClSO_4NaCa , из известняка SO_4Ca .

Минерализация вод, отжатых из проб пород при давлениях 1000, 2000, 3000 и 5000 атм, составила 57,5—88,6 г/л. Состав отжатых растворов при этих давлениях оставался постоянным — ClSO_4NaCa .

Состав вод, отжатых при давлениях свыше 500 атм, исходя из процентного содержания ионов, при поинтервальном увеличении давления изменяется слабо; изменения укладываются в величины, не превышающие 5%.

Существенные изменения в степени минерализации и ионном составе вод наблюдаются при давлении около 500 атм. Так, степень минерализации вод, отжатых при давлениях 100—400 атм, в несколько раз меньше степени минерализации вод, отжатых при 500 атм; степень минерализации вод, отжатых при давлениях выше 500 атм, незначительно превышает степень минерализации вод, отжатых при 500 атм. Ионный состав вод, отжатых при давлениях 100—400 атм, отличается от ионного состава вод, отжатых при больших давлениях, следующим образом: первые преимущественно кальциево-натриевые с большим содержанием гидрокарбонат-иона, хлора, сульфат-иона, а вторые хлоридно-сульфатные натриево-кальциевые. Таким образом, при давлениях, превышающих 400 атм, в отжатых водах увеличена роль кальция и сульфат-иона.

Влияние связанной воды на состав гравитационной воды в случае антропогенного вмешательства (под воздействием искусственных нагрузок и

пр.) может проявиться на меньших глубинах. Вследствие этого возможно возникновение в подземных водах агрессивных свойств (сульфатной агрессивности, жесткости) и других свойств, не благоприятных для инженерно-геологической деятельности человека. Особое значение имеет воздействие подземных вод, подвергшихся влиянию связанной воды, на прочностные свойства пород. Поступление в подземную воду сульфат-иона может вызвать сернокислотное выщелачивание карбонатных отложений и развитие или усиление карбонатного карста. В случае значительных концентраций в подземной воде кальция поступление в нее сульфат-иона может привести к насыщению подземной воды сульфатом кальция, выпадению его из воды и коагуляции породы.

Увеличение прочностных свойств пород с гидрогеохимических позиций связано с процессами адсорбции и выпадения из подземных вод в виде осадков слаборастворимых соединений. Наиболее существенно последнее. В осадок из подземных вод выпадают карбонаты кальция, кальция и магния, сульфаты кальция. Карбонаты кальция и магния начинают выпадать из подземных вод в нормальных термодинамических условиях при суммарной минерализации 0,5–0,6 г/л, сульфаты кальция — около 2,0 г/л.

Региональное исследование возможности протекания в том или ином районе процессов коагуляции пород с гидрогеохимических позиций должно проводиться комплексно. Комплексность исследования заключается в изучении следующих вопросов: а) литолого-минералогических особенностей отложений; б) гидродинамических условий; в) химического состава подземных вод; г) насыщенности подземных вод слаборастворимыми соединениями.

Литолого-минералогические особенности отложений рассматриваются как для водоносных комплексов, так и для разделяющих водоупоров.

Гидродинамические условия характеризуются относительно фильтрационных свойств отложений, питания, направления движения и разгрузки подземных вод.

На основании значений коэффициентов фильтрации водоносные комплексы расчленяются на участки, а по вертикали — на горизонты с относительно различными фильтрационными свойствами. В пределах верхнего водоносного комплекса в районе выделяются в разрезе четыре горизонта с различными коэффициентами фильтрации. В первых трех горизонтах значения коэффициентов фильтрации уменьшаются от верхнего к нижним, а в четвертом вновь увеличиваются.

Региональные гидродинамические условия первого от поверхности водоносного комплекса района отражают в целом характер грунтового водоносного комплекса с инфильтрационным питанием на водораздельных участках и с разгрузкой в долинах рек.

Второй водоносный комплекс имеет "пластовый" характер и является слабонапорным. Питание его также инфильтрационное на участках выходов на поверхность.

Движение подземных вод в первом водоносном комплексе происходит одновременно от водораздельных участков к долинам и вертикально вниз, в более погруженные части водоносного комплекса (рис. 37).

Химический состав подземных вод характеризуется через суммарную минерализацию, анионы, катионы. Выясняются закономерности изменения этих параметров в пространстве (по площади и в вертикальном разрезе). В пределах первого водоносного комплекса района сверху вниз от водоразделов к долинам рек гидрокарбонатные воды сменяются хлоридными. В этих же направлениях увеличивается суммарная минерализация подземных вод. Воды сульфатного типа практически не фиксируются (рис. 38).

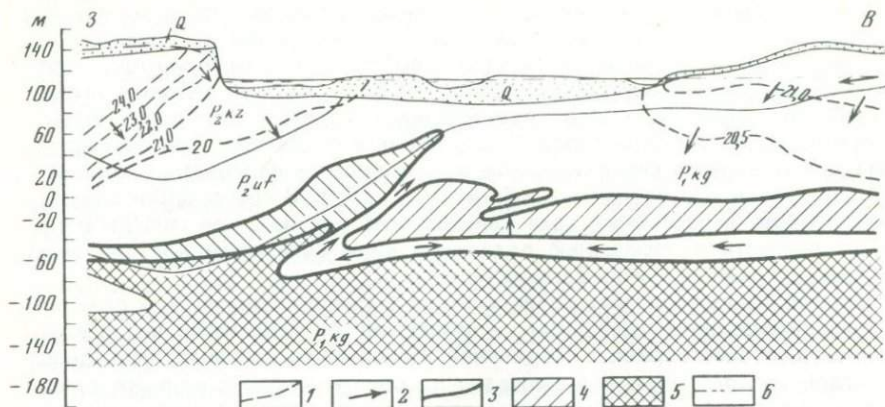


Рис. 37. Гидродинамический профиль

1 — изолиния приведенных напоров; 2 — линия тока подземных вод; 3 — границы водоносных комплексов и водоупоров; 4 — относительно водоупорный комплекс I; 5 — водоупорный комплекс II; 6 — пьезометрический уровень

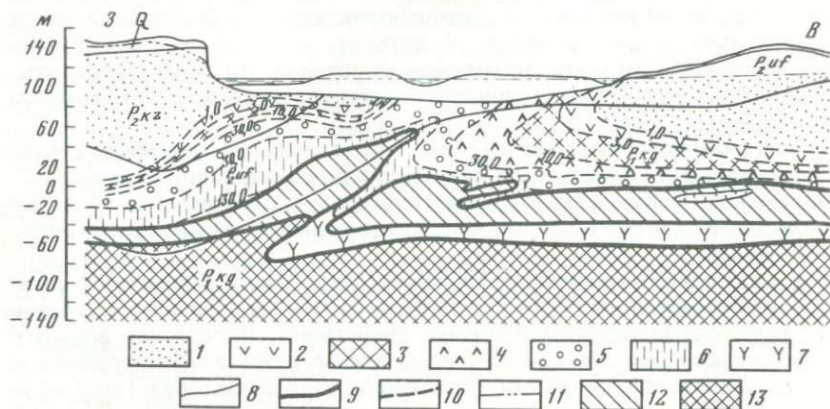


Рис. 38. Гидрогеохимический профиль

Степень минерализации подземных вод, г/л: 1 — от 0,2 до 1,0; 2 — от 1 до 3; 3 — от 3 до 10; 4 — от 10 до 30; 5 — от 30 до 50; 6 — от 50 до 130; 7 — > 130; 8 — литолого-стратиграфические границы; 9 — границы водоносных комплексов и водоупоров; 10 — изолинии степени минерализации; 11 — уровень подземных вод; 12 — относительно водоупорный комплекс I; 13 — водоупорный комплекс II

Подземные воды второго водоносного комплекса хлоридные; их суммарная минерализация возрастает в направлении движения.

Исследование насыщенности подземных вод предусматривает выделение участков по площади и в разрезе водоносных комплексов с различной степенью насыщенности карбонатом кальция, карбонатом кальция и магния, сульфатом кальция. Участки можно характеризовать в диапазоне величин насыщенности или с помощью изолиний насыщенности. В рассматриваемом примере по району подземные воды первого водоносного комплекса пересыщены карбонатом кальция. Степень пересыщения подземных вод карбонатом кальция увлечивается в направлении движения подземных вод. Гидрокарбонатные подземные воды этого же водоносного комплекса

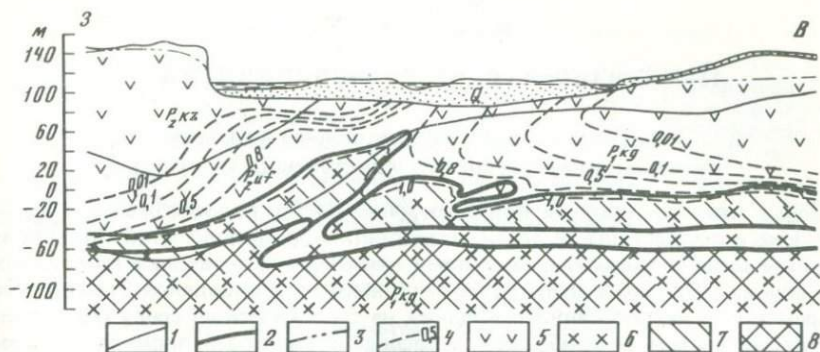


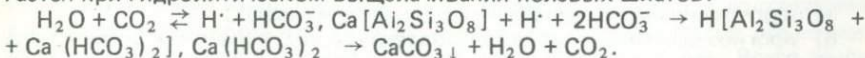
Рис. 39. Профиль насыщенности подземных вод сульфатом кальция

1 — литолого-стратиграфические границы; 2 — границы водоносных комплексов и водоупоров; 3 — пьезометрический уровень; 4 — изолинии насыщенности вод сульфатом кальция; 5 — воды, насыщенные сульфатом кальция; 6 — воды, перенасыщенные сульфатом кальция; 7 — относительно водоупорный комплекс I; 8 — водоупорный комплекс II

не пересыщены сульфатом кальция; пересыщены сульфатом кальция хлоридные воды данного комплекса и второго водоносного комплекса (рис. 39).

Для рассматриваемого района установлено, что верхняя граница развития по трещинам волокнистого гипса отчетливо расчленяет подземные воды на ненасыщенные и пересыщенные сульфатом кальция. Совместный анализ закономерностей распространения вторичных минералов и подземных вод с разной степенью насыщенности карбонатом кальция и сульфатом кальция позволяет сделать вывод о том, что породы, трещины которых выполнены кальцитом, вмещают воды, пересыщенные по карбонату кальция; породы, трещины которых выполнены гипсом, включают воды, пересыщенные сульфатом кальция и карбонатом кальция.

Возрастанию степени пересыщения подземных вод карбонатом кальция в направлении движения вод способствует уменьшение в этом направлении их подвижности и снижения вследствие этого концентрации в водах углекислого газа (реакция $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ сдвигается влево). Более значительное пересыщение вод карбонатом кальция достигается при гидролитическом выщелачивании полевых шпатов:



Этот процесс начинается при степени минерализации вод 0,6–0,8 г/л.

Пересыщение подземных вод сульфатом кальция в рассматриваемом примере связано со снижением растворимости гипса в хлоридных натриевых водах при суммарной минерализации свыше 140 г/л.

Прогнозно-охранные мероприятия

6.1. Геолого-гидрогеологические основы выделения зон потенциального ухудшения качества подземных вод

Еще в античные времена при сооружении систем водоснабжения, орошении почв и осуществлении других мелиоративных мероприятий, при строительстве были в значительной степени нарушены естественные геологические условия. Однако в целях более отчетливого представления о масштабах современного антропогенного влияния на геологическую среду мы условно рассматриваем ее изменения за последний короткий промежуток времени.

Гидрогеохимические свойства геологической среды выражаются через качество подземных вод. Каждому виду геологической среды присущи подземные воды с типичными для данных геолого-гидрогеологических условий геохимическими свойствами, выраженными через пространственные гидрогеохимические закономерности и комплекс факторов и процессов формирования их химического состава. Деятельность человека нарушает естественные гидрогеохимические условия; распознавание нарушения возможно на основе знаний закономерностей формирования естественных сред.

Химический состав антропогенно измененных подземных вод во многих случаях влияет на их качество, а следовательно, на хозяйственную их значимость. Знание химического состава антропогенно измененных подземных вод позволяет осуществлять следующие виды прогноза:

1) прогноз распространения в пределах водоносных комплексов или серии водоносных комплексов подземных вод с неблагоприятными физическими свойствами;

2) прогноз распространения подземных вод с повышенной и пониженной относительно норм суммарной минерализацией;

3) прогноз распространения подземных вод со специфическими свойствами, отрицательно влияющими на инженерные сооружения;

4) прогноз распространения подземных вод с изменяющимися под влиянием антропогенных факторов окислительно-восстановительными и щелочно-кислотными условиями;

5) прогноз миграции загрязнений в подземных водах;

6) прогноз изменения качества подземных вод в районах возможного загрязнения подземных вод и прогноз защищенности подземных вод от загрязнения.

Рациональное использование и охрана геологической среды с гидрогеохимических позиций теснейшим образом связаны с качественно-количественным прогнозом, основным на теоретических положениях миграции компонентов в условиях антропогенного влияния.

Прогноз охраны качества подземных вод имеет общие теоретические обоснования: а) геолого-гидрогеологических условий; б) генетических особенностей антропогенных гидрогеохимических аномалий; в) характера водовмещающих (и зоны аэрации) пород и отложений.

Оценка основных геолого-гидрогеологических условий гидрогеохимического прогноза заложена в систематику подземных вод по условиям охраны их качества (табл. 34). Систематика содержит категории подземных вод в соответствии с особенностями их залегания; характеристику деятельности человека, отражающейся на качестве подземных вод каждой

Таблица 34

Систематика подземных вод по условиям охраны их качества

Категория подземных вод	Виды антропогенной деятельности	Структурно-тектонические условия	Интенсивность проявления антропогенных факторов
Подземные воды грунтового водоносного комплекса	<ol style="list-style-type: none"> 1. Загрязнение 2. Децентрализованное водоснабжение 3. Разработка полезных ископаемых 4. Инженерно-геологическая деятельность 5. Мелиоративные мероприятия 	Горно-складчатые области; кристаллические массивы; платформенные области с гумидным климатом, с аридным климатом, с многолетней мерзлотой	Значительная
Подземные воды слабонапорных водоносных комплексов зоны интенсивного водообмена	<ol style="list-style-type: none"> 1. Централизованное водоснабжение 2. Разработка полезных ископаемых 3. Инженерно-геологическая деятельность 	Платформы; предгорные прогибы; межгорные впадины	Относительно значительная
Подземные воды напорных водоносных комплексов артезианских бассейнов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разработка полезных ископаемых 2. Подземное захоронение отходов 	Платформы; предгорные прогибы; межгорные впадины	Слабая

категории; деление подземных вод каждой категории на типы с учетом геологических структур и климата; характеристику интенсивности влияния антропогенных факторов на качество подземных вод выделенных типов. Последнее отражено тремя степенями интенсивности.

Генетические особенности антропогенных гидрогеохимических аномалий отражены в их генетической классификации (табл. 35). Классификация содержит деление гидрогеохимических аномалий на типы в соответствии с характером антропогенного воздействия. Каждый тип аномалий объясняется причинами возникновения и процессами формирования. Всего выделяются четыре типа антропогенных гидрогеохимических аномалий со своеобразными причинами возникновения, процессами формирования, а также формами, размерами и другими характеристиками.

Характер водовмещающих (и зоны аэрации) пород обуславливает конкретные физико-химические процессы, суммарную минерализацию и присутствие основных компонентов в подземных водах, которые в целом образуют среду со специфическими свойствами, своеобразно сказывающуюся на качестве подземных вод в антропогенных условиях (табл. 36).

Рассматривая вопрос о мероприятиях, направленных на охрану подземных вод от загрязнения, следует иметь в виду, что практически любые мероприятия способствуют уменьшению влияния на подземные воды загрязнения, хотя и не всегда исключают возможность загрязнения. Комплекс мероприятий и их характер всегда должны предусматривать макси-

Таблица 35

Генетическая классификация антропогенных гидрогеохимических аномалий

Типы аномалий	Основные причины возникновения	Главные процессы формирования	
Загрязнения	Поступление компонентов-загрязнителей: 1) промышленных, 2) сельскохозяйственных, 3) бытовых	С атмосферными осадками; с поверхностными водами; из источников загрязнения	Массоперенос; массообмен (сорбция, катионный обмен)
Нарушения гидродинамического режима	1) подток подземных вод данного водоносного комплекса, 2) переток подземных вод из выше- или нижележащих водоносных комплексов, 3) подток морских вод, 4) подток вод из водохранилищ	При эксплуатации для водоснабжения; при разработке полезных ископаемых; при инженерно-геологической деятельности; в связи с мелиоративными мероприятиями	Смешение; массообмен (выщелачивание, растворение, кристаллизация)
Нарушения геогеохимического режима	Изменение окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условий вследствие: 1) изменения уровня подземных вод, 2) подтока и перетока посторонних подземных вод	При эксплуатации для водоснабжения; при разработке полезных ископаемых; при инженерно-геологической деятельности; в связи с мелиоративными мероприятиями	Массообмен (выщелачивание, растворение, кристаллизация)
Смешанные	Поступление загрязнений в подземные воды при нарушении гидродинамического режима, выраженного через: а) подток загрязненных вод данного водоносного комплекса; б) переток загрязненных вод из посторонних комплексов; в) подток загрязненных поверхностных вод	При эксплуатации для водоснабжения; при разработке полезных ископаемых; при инженерно-геологической деятельности; в связи с мелиоративными мероприятиями	Смешение, массоперенос; массообмен (сорбция, катионный обмен, выщелачивание, растворение, кристаллизация)

мально вероятное приближение к такому положению, которое бы исключало загрязнение подземных вод.

Наиболее распространенными и важными мероприятиями, направленными на охрану подземных вод от загрязнения, являются следующие: 1) правильная оценка охранной зоны подземных вод хорошего качества; 2) учет геолого-гидрогеологических условий при возведении хранилищ твердых и жидких отходов; 3) целесообразная обработка отходов производства и других в целях уменьшения степени их вредности (токсичности); 4) строгое соблюдение правил хранения и транспортировки про-

дуктов, товаров, удобрений и т.д.; 5) соблюдение правил использования минеральных удобрений.

При установлении границ зоны охраны подземных вод от загрязнения в любых хозяйственных и инженерных целях должно строго учитываться все разнообразие природных условий и геохимических свойств компонентов-загрязнителей, определяющих длины путей миграции загрязнений в подземных водах и преобладающие направления их распространения.

Установление границ охранной зоны особенно важно на участках эксплуатации подземных вод для водоснабжения. Охранная зона должна устанавливаться в этом случае таким образом, чтобы был запас гарантии от загрязнения подземных вод водозаборного участка.

Размеры охранной зоны должны быть обоснованы с максимально возможных позиций. Последнее требует учета геолого-гидрогеологических условий проявления причин, возникающих при эксплуатации подземных вод и приводящих к ухудшению их качества вследствие особых условий миграции компонентов-загрязнителей.

Имеет место большое разнообразие гидрогеологических условий, существенно влияющих на характер и интенсивность изменения качества подземных вод эксплуатируемых водоносных комплексов и горизонтов под влиянием загрязнения.

Обработка отходов в целях уменьшения их токсичности требует разработки специальных методик и технологических схем. Однако возможны в этом отношении и рекомендации гидрогеологического плана. Так, вредные отходы промышленных предприятий или отходы, содержащие легко мигрирующие в подземных водах компоненты-загрязнители, должны подвергаться перед помещением их в отвалы сожжению (например, масла и некоторые технические смолы); многие отходы металлургической, гальванической, а также радиоактивной отраслей промышленности следует запекать; ядовитые вещества (циановые и др.) необходимо подвергать химическому разложению. Разложению твердых промотходов способствуют окислительно-восстановительные условия, создаваемые в отвалах. Так, в восстановительных условиях отвалов продуктами разложения многих твердых промышленных отходов являются CH_4 , H_2O , CO_2 , H_2 , а также не претерпевшие до конца разложения некоторые масла, алкоголи.

В окислительных условиях полное разложение промотходов в отвалах сопровождается обогащением подземных вод ионами Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Na^+ , K^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} ; в водах образуется большое число аэробных бактерий.

При рациональном подходе к промотходам их можно использовать для удобрения. В случае, когда промотходы содержат органические вещества, применяется утилизация промотходов по методу гумификации. Утилизация промотходов способствует ослаблению загрязнений подземных вод.

В случае жидких промотходов охранными мероприятиями предусматривается строгое нормирование ввода в эксплуатацию отстойников и обезвреживание наиболее токсичных отходов.

Большое значение в качестве охранных мероприятий от загрязнения подземных вод имеет соблюдение определенных геолого-гидрогеологических условий при заложении отвалов.

В целях ограничения подземных вод от влияния на них минеральных удобрений рекомендуется:

а) использовать удобрения без балласта; например, лучше пользоваться в качестве удобрения NH_4NO_3 , а не $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, где сульфат-ион — балласт. Для NH_4NO_3 катион и анион — удобрения;

б) вводить удобрения, слаборастворимые в воде; в этом случае удобре-

Таблица 36
Классификация водовмещающих (и зоны аэрации) пород
по физико-химическим процессам воздействия
на них подземных вод в антропогенных условиях

Категория подземных вод	Характеристика пород	Миграционная система				
Поверхностные воды грунтового водоносного комплекса и слабонапорных водоносных комплексов зоны интенсивного водообмена	Песчаные силикатные морские и континентальные	Подземная вода-порода				
	Песчаные алюмосиликатные морские и континентальные	Подземная вода-порода-CO ₂				
	Песчаные с сульфидами металлов морские и континентальные	Подземная вода-порода-O ₂				
	Песчаные карбонатизированные морские и континентальные	Подземная вода-порода-CO ₂				
		Подземная вода-порода-H ₂ SO ₄				
	Песчано-глинистые морские	Подземная вода-порода				
	Глинистые континентальные	То же				
	Глинистые морские	"				
	Известняки морские	Подземная вода-порода-CO ₂				
	Доломиты морские	То же				
Подземные воды напорных водоносных комплексов артезианских бассейнов	Сульфатные	Подземная вода-порода				
	Галогенные лагунно-морские	То же				
	Галогенные континентальные	"				
	Песчаные	} Морские	"			
				Песчано-глинистые		
					Известняки	
						Доломиты
	Сульфатные	"	"			
	Галогенные	} галитовые калийные магнезиальные	Лагунно-морские			
"						
				"		

ния могут длительное время использоваться растениями, что препятствует их поступлению в подземные воды;

в) по возможности вместо минеральных удобрений использовать органические в виде зеленой массы;

г) применять удобрения в количествах, установленных в соответствии с емкостными свойствами конкретных почв, т.е. в количествах, не превышающих норму для данной среды;

Процессы	Состав воды	
	Σ _М , г/л	Характерные компоненты
Гидролиз	До 1	SiO ₂
Гидролитические и углекислотное выщелачивание	До 1	HCO ₃
Окисление	До 1	SO ₄ , Fe и др.
Углекислотное выщелачивание	До 1	HCO ₃ , Ca, Mg
Сернокислотное выщелачивание	До 3	SO ₄ , Ca, Mg
Переход в воду ионно-солевого комплекса	До 3	Cl, Na
Катионный обмен	До 1	Ca, Mg
Переход в воду ионно-солевого комплекса и катионный обмен	> 1	Cl, Na
Углекислотное выщелачивание	До 1	HCO ₃ , Ca
То же	До 1	HCO ₃ , Ca, Mg
Растворение	До 3	SO ₄ , Ca, Mg
"	До 50 и >	Cl, Na, K, Mg
"	До 50 и >	SO ₄ , Cl, Na, Mg
Метасоматоз		Cl, Na; Cl, Na, Ca, (Ca, Na)
Метасоматоз, катионный обмен	> 25	Cl, Na, Ca, Mg, (Cl, Ca, Na, Mg)
Выщелачивание водами с повышенной ионной силой	> 25	Cl, Na, Ca, (Ca, Na); Cl, Na, Ca, Mg;
То же	> 50	Cl, Na, Mg, Ca
Растворение	> 100	SO ₄ , Cl, Na (Cl, SO ₄)
		Cl, Na;
		Cl, K;
		Cl, Na, Mg, (Mg, Na)

д) при удобрении соблюдать соответствие и пропорции между азотом, калием, фосфором;

е) использовать готовые удобрения, содержащие макро- и микрокомпоненты в хороших пропорциях.

Особый тип загрязнения подземных вод формируется в аварийных случаях, в случаях плохой транспортировки и неправильного хранения различных продуктов и веществ, содержащих неприятные и вредные для

человека и окружающей его среды компоненты. Охранные мероприятия при таком типе загрязнения в основном заключаются в соблюдении правил хранения и транспортировки.

Специальным прогностическим вопросом является выделение зон потенциального ухудшения качества подземных вод, в том числе за счет загрязнения.

Опасность ухудшения качества подземных вод следует рассматривать с позиций проявления двух групп факторов: 1) хозяйственной деятельности человека; 2) естественных геолого-гидрогеологических условий. Хозяйственная деятельность человека определяет возникновение опасности ухудшения качества подземных вод, природные же условия — формирования гидрогеохимических антропогенных аномалий, характеризующихся в зависимости от конкретных геолого-гидрогеологических условий своеобразными чертами — формой, размером, зональностью и др.

В целом обе группы факторов разнообразны в различных регионах, что приводит к формированию обособленных зон потенциального ухудшения подземных вод.

Выявление зон потенциального ухудшения качества подземных вод, вызываемого хозяйственной деятельностью человека, требует знания этих объектов его деятельности. Необходимо также иметь сведения о компонентах-загрязнителях и данные, позволяющие оценить степень влияния объекта загрязнения на подземные воды (например, объемы продукции и применяемого сырья, технологию производства и технологию обезвреживания промстоков и т.д.). На основе этих сведений можно оценить зону влияния на подземные воды загрязнений, связанных с данным объектом.

Выделение зон потенциального ухудшения качества подземных вод вследствие загрязнения значительно усложняется при учете геолого-гидрогеологических условий.

Геолого-гидрогеологические предпосылки выделения зон потенциального ухудшения качества подземных вод представлены факторами, обуславливающими быстрое проявление антропогенного изменения качества подземной воды, т.е. факторами, способствующими проникновению загрязнений в подземные воды и их миграции в водоносном комплексе (горизонте).

С этих позиций к геолого-гидрогеологическим предпосылкам выделения зон потенциального ухудшения качества подземных вод относятся:

1) литолого-минералогический состав пород и отложений зоны аэрации или перекрывающего водоносного комплекса (горизонта), рассматриваемый с позиции оценки возможности самоочищения воды посредством сорбционных процессов;

2) литологический состав пород и отложений зоны аэрации или перекрывающего водоносного комплекса (горизонта), рассматриваемый с позиции оценки степени проницаемости загрязненной воды в исследуемый водоносный комплекс;

3) мощность слабопроницаемых (суглинистых и глинистых) пород и отложений зоны аэрации или перекрывающего водоносного комплекса (горизонта);

4) характер движения воды, питающей рассматриваемый водоносный комплекс (горизонт), и условия ее движения в этом водоносном комплексе (горизонте): фильтрационные свойства пород и отложений, скорость и направление движения воды.

При комплексной (с учетом более полного перечня геолого-гидрогеологических показателей, характера загрязнений и путей переноса их в водоносные комплексы) оценке зон потенциального ухудшения качества

подземных вод вследствие загрязнения выделяются условия формирования зон максимально возможного загрязнения. К ним относятся: 1) условия миграции загрязнений с поверхности земли или с поверхностными водами в пределах распространения карстовых и трещиноватых пород; в этом случае загрязнения распространяются на большие расстояния в направлении движения воды; самоочищение практически отсутствует; 2) условия миграции загрязнений в подземных водах крупнозернистых отложений (гравий, галечник, крупнозернистые пески); пути поступления загрязнений в водоносный комплекс (горизонт) могут быть разнообразными; загрязнения занимают значительные площади; 3) условия миграции загрязнений в подземных водах, приуроченных к отложениям террас, гидравлически связанных с речными водами; в случае загрязнения речной воды особенно большая опасность поступления загрязнений в подземные воды наблюдается при сложении террас песчано-галечниковыми отложениями.

В условиях интенсивной эксплуатации подземных вод зоны потенциального ухудшения качества вод чаще всего связаны: 1) с существованием значительных гидрогеохимических градиентов по вертикальному разрезу, особенно проявляющихся в случаях естественной гидравлической связи между водоносными комплексами вертикального разреза; 2) с наличием больших гидрогеохимических градиентов по горизонтали, т.е. в пределах отдельно взятых водоносных комплексов, при существовании пространственных изменений в химическом составе подземных вод; 3) с причленением подземных вод к поверхностным водоемам с водами худшего качества; 4) с присутствием в породах и отложениях относительно легко растворимых минералов (гипсов и др.) и с обогащенностью пород и отложений водно-растворимым комплексом (хлором и натрием четвертичных песчано-глинистых отложений морского генезиса и пр.); 5) с существованием восстановительных условий, которые при антропогенном воздействии нарушаются и сменяются окислительными условиями. Это приводит к изменению массообмена по ряду компонентов, в частности к интенсивному переходу в подземные воды из пород и отложений железа, алюминия и прочих элементов, и к накоплению сульфатов.

Районы с различными геолого-гидрогеологическими условиями, попадающие в зоны потенциального ухудшения качества подземных вод, характеризуются разной степенью возможности ухудшения качества воды. В связи с этим предлагаются классификации зон потенциального ухудшения качества подземных вод по степени ухудшения. Приведем пример такой классификации: I — зоны большой опасности; II — зоны отчетливой опасности; III — зоны умеренной опасности; IV — зоны небольшой опасности; V — зоны почти безопасные. Возможны и другие классификационные градации.

Выявление зон потенциального ухудшения качества подземных вод позволяет составлять региональные прогнозы изменения гидрогеохимических условий под влиянием антропогенных факторов. На основе детального изучения геолого-гидрогеологических условий оказывается возможным планирование рационального освоения конкретного региона с учетом сохранности хорошего качества подземных вод. Составляемые с этой целью специализированные карты охраны подземных вод должны содержать сведения об участках с наиболее существенной опасностью ухудшения качества вод. Эти сведения являются основой для установления охраняемых мероприятий, например зон санитарной охраны водозабора и пр.

Прогноз распространения зон потенциального ухудшения качества подземных вод вследствие загрязнения осуществляется путем сравнения

фактических данных химического состава подземных вод по конкретным водопунктам (скважинам, родникам и др.) с химическим составом этих же вод, принимаемым за фоновый состав. В случае, если отношение фактического состава к фоновому меньше или близко к единице, загрязнение подземных вод отсутствует, т.е. химический состав подземных вод формируется в естественных геолого-гидрогеологических условиях. Если отношение фактического состава к фоновому превышает единицу, то рассматриваемые подземные воды загрязнены. Загрязнение подземных вод может оцениваться таким способом по макрокомпонентам, микрокомпонентам, органическим компонентам, микроорганизмам, т.е. по компонентам-загрязнителям любого состава.

На гидрогеологических картах зоны потенциального ухудшения качества подземных вод вследствие загрязнения соответствуют зонам начального загрязнения. Это значит, что содержание компонента-загрязнителя в подземной воде в пределах зоны начального загрязнения выше фонового, но ниже нормы, предусмотренной ГОСТом. На картах зоны начального загрязнения подземных вод оконтуриваются границами, в пределах которых возможно выделение участков, характеризующихся разной степенью загрязнения. Участки подземных вод с максимальной степенью начального загрязнения располагаются в центре зоны, с минимальной — у границы с незагрязненными подземными водами.

Самым сложным вопросом прогноза распространения зон начального загрязнения подземных вод является определение фоновых содержаний компонентов в подземных водах. Достоверность определения фоновых содержаний компонентов в подземных водах достигается учетом максимально возможного числа факторов, влияющих на формирование фоновых содержаний. Среди факторов особое место занимает компонентный состав подземных вод. Значимость факторов определяется посредством корреляционно-регрессионного анализа. Выделяются главные и второстепенные факторы. Главные факторы служат основой для расчета фоновых содержаний компонентов. Такой подход к определению зоны потенциального ухудшения качества подземных вод является обоснованным и вполне достоверным.

6.2. Количественный прогноз изменения качества подземных вод

В данном разделе рассматривается решение наиболее распространенных типовых задач по определению изменения в пространстве и во времени концентрации в подземных водах посторонних компонентов, поступающих в них вследствие загрязнения, захоронения промстоков, перетоков вод из соседних водоносных комплексов при усиленной эксплуатации данного водоносного комплекса и т.д. Приводятся теоретическое обоснование решения задач и примеры решения. В теоретическом обосновании главное внимание обращено на уравнение миграции и на учет физико-химических процессов при определении изменения концентрации посторонних компонентов в подземных водах.

Известно, что изменения концентрации посторонних компонентов в подземных водах могут быть описаны дифференциальными уравнениями. На основе этих уравнений и осуществляется прогнозирование изменения качества подземных вод. Члены, входящие в дифференциальные уравнения, отражают влияние на изменения концентрации посторонних компонентов в подземных водах процессов массопереноса и массообмена. Вид этих уравнений, значения входящих в них коэффициентов, а также граничные условия позволяют учитывать своеобразие геолого-гидрогео-

202

логических условий конкретных регионов. Так, например, мы можем решать задачу прогноза изменения концентрации загрязнения в изолированном водоносном пласте или в двухпластовой (трехпластовой) системе при наличии или отсутствии инфильтрации, при наличии (наряду с основными) дополнительных источников загрязнения и т.д.

Процессы массопереноса представлены молекулярной диффузией, конвективным переносом и конвективной дисперсией.

Молекулярная диффузия — это процесс распространения посторонних компонентов в водоносном пласте под действием градиента концентрации вещества в различных точках пласта. Однако это перемещение происходит настолько медленно, что может не учитываться, если речь идет о прогнозах на сроки менее 100—200 лет и на расстояния более нескольких метров.

Конвективный перенос и конвективная дисперсия — процессы распространения посторонних компонентов в водоносном комплексе под действием фильтрационного потока подземных вод. Конвективный перенос — это перенос загрязнения и других посторонних компонентов фильтрационным потоком. При переносе жидкие загрязнения вытесняют подземную воду. Перенос осуществляется со скоростью фильтрационного потока. Четкая граница между жидкими загрязнениями и подземной водой обычно отсутствует; формируется зона смешения, в которой концентрация компонентов постепенно изменяется от максимальных содержаний загрязнений на входе в водоносный комплекс до фоновых. Формирование зоны смешения связано с конвективной дисперсией, подразделяющейся в фильтрационном потоке на микродисперсию и макродисперсию. Наибольшее значение имеет микродисперсия. Микродисперсия растворенных и эмульгированных в воде веществ обусловлена микронеоднородностью водоносного пласта (различными ориентацией и размерами пор и трещин в породах). Выделяют микродисперсию, развивающуюся в направлении средней скорости движения подземных вод, так называемую продольную микродисперсию, и поперечную микродисперсию — перпендикулярно средней скорости движения подземных вод.

Продольная микродисперсия наиболее четко может быть прослежена в пласте, ограниченном непроницаемыми прослойками при поступлении в него вещества на протяжении всего входного сечения (рис. 40) и при переносе вещества плоскопараллельным потоком. На входе в это сечение все струйки воды имеют равные концентрации вещества, параллельно направлены и по величине равны скорости движения. При дальнейшем продвижении по извилистым поровым и трещинным каналам струйки воды приобретают различные скорости движения. Поэтому к расчетному моменту времени $t_{cp} = x \cdot n/v$ (где n — активная пористость, v — средняя скорость движения воды) не все элементарные струйки воды придут с концентрацией, равной начальной. Образуется зона продольной микродисперсии AB .

Поперечная микродисперсия в одномерном фильтрационном потоке может быть прослежена, если загрязняющее вещество поступает только через часть MN входного сечения. В результате отклонения струек воды в поровых каналах и трещинах от среднего направления фильтрационного потока происходит перемещение частиц воды и растворенных в ней веществ в направлении, поперечном фильтрационному потоку. Под влиянием этого процесса поперечные размеры загрязнения, определяемые первоначально сечением MN , увеличиваются.

Фильтрационная микродисперсия характеризуется коэффициентами продольной и поперечной микродисперсии D_x и D_y . Коэффициент продольной микродисперсии D_x в однородной пористой среде изучен в много-

численных лабораторных экспериментах. Экспериментами установлено, что при малых скоростях v фильтрационного потока $D_x = \lambda_1 v$, при больших скоростях v фильтрационного потока $D_x = \lambda_1 v + \lambda_2 v^2$, где λ_1 и λ_2 — параметры, характеризующие геометрическую структуру порового пространства.

Процессы массообмена представлены двумя группами процессов. Процессы одной группы способствуют удалению посторонних компонентов из подземных вод; это сорбция, ионный обмен, образование твердого вещества и выпадение его из вод. Одним из основных среди перечисленных процессов массообмена является сорбция. Сорбция — это процесс поглощения из воды грубодисперсных, коллоидных и растворенных компонентов при соприкосновении загрязненных подземных вод с поверхностью зерен породы водоносного комплекса, в котором происходит движение

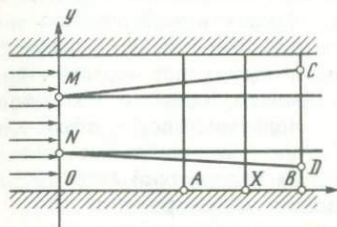


Рис. 40. Схема формирования продольной микродисперсии

загрязненных подземных вод. Для прогноза движения различных видов загрязнений в подземных водах применяется уравнение

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \alpha (C - \beta N), \quad (1)$$

где N — количество сорбированного вещества; C — концентрация вещества в воде; α — коэффициент скорости сорбции; β — коэффициент распределения вещества в равновесных условиях $\beta = C_0/N_0$; C_0 и N_0 — предельные равновесные концентрации в растворе и сорбенте. Уравнение (1) применяется также для описания обратимых процессов — десорбции и других процессов удаления вещества из сорбента. При необратимой сорбции, обусловленной неограниченно большой сорбционной емкостью водоносного пласта (когда $\beta \ll 1$), уравнение (1) принимает вид

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \alpha C. \quad (2)$$

Процесс сорбции может приобрести равновесный характер, если скорость сорбционного процесса значительна. Из уравнения (1) следует, что

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial N}{\partial t} = C - \beta N, \quad (3)$$

и если $\alpha \rightarrow \infty$, то $C = \beta N$ и, следовательно,

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (4)$$

т.е. скорость сорбции прямо пропорциональна скорости изменения концентрации вещества в растворе.

Процессы массообмена другой группы представлены выщелачиванием

(углекислотным, сернокислотным, окислением, выщелачиванием растворами с повышенной ионной силой) и растворением. Они осуществляются как со стороны подземных вод по отношению к твердым загрязнителям, так и со стороны загрязненных подземных вод по отношению к породам. Применительно к фильтрации в засоленных породах уравнение кинетики растворения может быть записано в следующем виде:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\alpha_p (C_H - C) \sqrt{N}, \quad (5)$$

при пленочном засолении

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\alpha_p (C_H - C), \quad (6)$$

где N — масса твердых солей, находящаяся в породе в момент времени t ; C_H и C — концентрации насыщенного раствора и текущая; α_p — константа скорости растворения.

Рассмотрим уравнение миграции загрязнений или других посторонних компонентов в подземных водах. Уравнение миграции загрязнений в подземных водах представляет собой уравнение баланса массы загрязняющего вещества в элементе водоносного пласта и имеет следующий вид:

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} = n \frac{\partial C}{\partial t} + n \frac{\partial N}{\partial t} - \frac{w_1 - w_2}{m}, \quad (7)$$

где $C = C(t, x, y)$ — концентрация загрязняющего вещества в момент времени t в точке с координатами (x, y) ; v_x и v_y — скорости фильтрации в направлении осей x и y соответственно; D_x и D_y — коэффициенты конвективной дисперсии в направлении осей x и y ; m — мощность пласта; n — активная пористость; w_1 и w_2 — величины, характеризующие отвод или поступление загрязнений через кровлю и подошву пласта; N — концентрация убывающего из раствора (сорбирующегося) или поступающего в раствор загрязняющего вещества за счет внутренних физико-химических реакций на единицу массы воды.

При наличии в кровле и подошве пласта слабопроницаемых разделяющих слоев членом $(w_1 - w_2)/m$ в уравнении (7) пренебрегают. В тех случаях, когда слои кровли и подошвы представлены хорошо проницаемыми породами, этим членом пренебрегать нельзя. В этом случае мы имеем

$$w_1 = \left[-D_z \frac{\partial C}{\partial z} + v_{z_1} C \right]_{z=z_1}, \quad (8)$$

$$w_2 = \left[-D_z \frac{\partial C}{\partial z} + v_{z_2} C \right]_{z=z_2}, \quad (9)$$

где v_{z_1} , v_{z_2} — скорости фильтрации воды на границах пласта в вертикальном сечении, т.е. на кровле и подошве; D_z — коэффициент конвективной дисперсии в направлении оси z (рис. 41). Входящий в уравнение член $n \frac{\partial N}{\partial t}$, которым описывается кинетика поглощения загрязняющего

вещества из раствора, может быть заменен в зависимости от характера процесса на (2), (3), (4), (5) или (6).

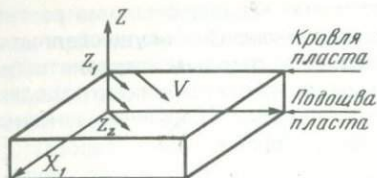


Рис. 41. Схема условий распространения загрязнений в элементе водоносного пласта

Подставив нужные выражения для членов $(w_1 - w_2)/m$ и $n \frac{\partial N}{\partial t}$ уравнения (7), мы получаем уравнение, являющееся исходным для решения задачи по миграции загрязняющих веществ в водоносных пластах.

Для решения конкретных задач по миграции загрязнений должны быть заданы начальные и граничные условия. В качестве начального условия принимается то или иное естественное (фоновое) распределение концентрации вещества в пласте $C(0, x, y)$. Условия на границах пласта L можно поставить тремя различными способами:

1) задана концентрация на границе пласта

$$C(t, x, y)|_L = f(t), \quad (10)$$

где $f(t)$ — известная функция;

2) задан поток вещества на границе пласта

$$D_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_y \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_L = Q(t); \quad (11)$$

3) задан поток вещества на границе пласта с учетом конвективного отвода и дисперсии

$$D_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_y \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_L = v(C - C_{вх}), \quad (12)$$

где $C_{вх}$ — концентрация вещества в растворе, поступающего на границу L пласта извне.

Приведем решения ряда типовых прогнозных задач.

Задача 1. Прогноз распространения загрязнения нейтральным компонентом в подземных водах при условии, что в изолированный пласт непрерывно поступает вода с постоянной концентрацией $C_{вх}$ (1).

Пусть одна из осей координат x совпадает с направлением движения подземных вод. Тогда в уравнении миграции (7) мы можем пренебречь конвективной дисперсией вдоль оси y . Поскольку компонент-загрязнитель нейтральный, то $\frac{\partial N}{\partial t} = 0$. Вследствие того что пласт изолированный,

$w_1 = w_2 = 0$. Следовательно, уравнение миграции в сформулированных условиях принимает вид

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} = n \frac{\partial C}{\partial t}, \quad t > 0, \quad x > 0, \quad (13)$$

$$C(0, x) = 0, \quad C(t, 0) = C_{вх}, \quad C(t, x) \rightarrow 0, \quad \text{при } x \rightarrow \infty.$$

Решением этого уравнения является

$$C(t, x) = \frac{1}{2} C_{\text{вх}} [\operatorname{erfc}(\xi - \eta) + e^{4 \cdot \xi \cdot \eta} \operatorname{erfc}(\xi + \eta)], \quad (14)$$

где

$$\eta = \frac{vt/n}{2\sqrt{Dt/n}}, \quad \xi = \frac{x}{2\sqrt{Dt/n}}.$$

Если $D/\sqrt{x} \ll 0,005$, то вторым членом в выражении (14) можно пренебречь, ошибка при этом менее 4% и

$$C(t, x) = \frac{1}{2} C_{\text{вх}} \operatorname{erfc}([x - vt/n] / [2\sqrt{Dt/n}]). \quad (15)$$

Координата точки с любой наперед заданной концентрацией C находится из равенства

$$x = vt/n + 2\sqrt{Dt/n} [\operatorname{arc} \operatorname{erfc}(1 - 2C/C_{\text{вх}})], \quad (16)$$

а скорость движения точки с концентрацией C составляет

$$\frac{\partial x}{\partial t} = v/n + \sqrt{D/t n^3} [\operatorname{arc} \operatorname{erfc}(1 - 2C/C_{\text{вх}})]. \quad (17)$$

Отсюда видно, что точка с концентрацией $C = 1/2 C_{\text{вх}}$ движется с постоянной скоростью, равной v/n .

Из анализа решения следует, что образуются три зоны с различным содержанием вещества (рис. 42): 1) зона, где концентрация компонента-загрязнителя близка к $C_{\text{вх}}$; 2) зона, где концентрация компонента-загрязнителя близка к нулевой; 3) зона дисперсии, где концентрация компонента-загрязнителя меняется от $C_{\text{вх}}(1 - \epsilon)$ до $\epsilon C_{\text{вх}}$, где ϵ — малое число. Длина зоны дисперсии для $\epsilon = 0,01$ равна

$$L_d \approx 6,6 \sqrt{Dt/n}. \quad (18)$$

Задача 2. Прогноз распространения загрязнения нейтральным компонентом в подземных водах при условии кратковременного поступления загрязняющего вещества в водоносный комплекс.

В этой задаче имеем уравнение миграции

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} = n \frac{\partial C}{\partial t}, \quad t > 0, \quad x > 0 \quad (19)$$

при $C(0, x) = 0$; $C(t, 0) = \begin{cases} C_{\text{вх}}, & 0 < t < t_n \\ 0, & t > t_n \end{cases}$, $C(t, x) \rightarrow 0$ при $x \rightarrow \infty$.

Решением этой задачи является

$$C(t, x) = \frac{1}{2} C_{\text{вх}} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x - vt/n}{2\sqrt{Dt/n}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x - v(t - t_n)/n}{2\sqrt{Dt/n}}\right) \right]. \quad (20)$$

Вследствие дисперсии границы области загрязнения размываются. Если первоначально длина области загрязнения была равна $l_n = vt_n/n$, то по мере продвижения в водоносном комплексе длина области загрязнения будет увеличиваться, а максимальная концентрация компонента уменьшаться.



Рис. 42. Схема положения зоны дисперсии

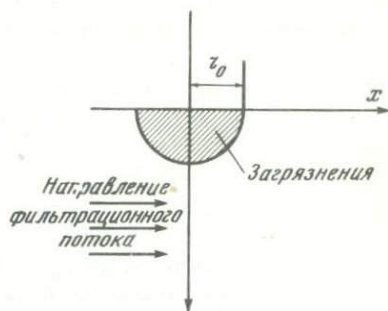


Рис. 43. Схема положения источника загрязнения

Из решения можно найти время t_{\max} прихода максимальной концентрации компонента-загрязнителя в точку x и максимальную концентрацию C_{\max} в этой точке. Если $t_n/t_{\max} < 0,07$, то

$$t_{\max} \approx x \cdot n/v + 0,5t_n. \quad (21)$$

Отсюда можно определить C_{\max} , которое есть $C(t_{\max}, x)$, где $C(t, x)$ определяется формулой (20).

Задача 3. Прогноз распространения загрязнения нейтральным компонентом в подземных водах с учетом поперечной дисперсии.

Пусть постоянно действующий источник загрязнения представляет собой вытянутый бассейн. В разрезе по направлению фильтрационного потока можно изобразить это схематически (рис. 43).

Считается, что радиус бассейна мал, длина бассейна и мощность водоносного комплекса велики, так что влияние подошвы комплекса можно не учитывать.

В этих условиях уравнение миграции следующее:

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial C}{\partial t}. \quad (22)$$

Величины v_x и v_y в этой задаче не являются постоянными, а зависят от координат x, y и от концентрации C . Строгое решение уравнения (22) можно осуществить только численным методом.

Упростив задачу, считаем v_x и v_y постоянными. Тогда на границе бассейна L

$$C(t, x, y)|_L = C_{вх}, \quad C(0, x, y) = 0, \quad \text{если } \sqrt{x^2 + y^2} > r_0, \quad (23)$$

где r_0 — радиус бассейна.

$$C(t, x, y) \rightarrow 0 \quad \text{при } \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty.$$

При этом решение представится в форме

$$C = C_{вх} \exp[\alpha(x - x_0) + \sigma(u - u_0)] (R_1 - R_2), \quad (24)$$

$$R_1 = K_0 (r \sqrt{nv/D_x}) / K_0 (r_0 \sqrt{nv/D_x}), \quad (25)$$

$$\text{где } R_2 = \frac{2f_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\exp(-vt - \lambda^2 f_0) [I_0(\lambda \bar{r}) N_0(\lambda) - I_0(\lambda) N_0(\lambda \bar{r})] \lambda d\lambda}{(vt + f_0 \lambda^2) [I_0^2(\lambda) + N_0^2(\lambda)]}. \quad (26)$$

I_0, N_0 — функции Бесселя нулевого порядка действительного аргумента; K_0 — функция Бесселя нулевого порядка мнимого аргумента,

$$u_0 = y_0 \sqrt{D_x/D_y}, \quad u = y \sqrt{D_x/D_y}, \quad \alpha = v_x/(2D_x), \quad \sigma = v_y/(2D_y), \quad (27)$$

$$\nu = \frac{v_x^2 + v_y^2}{4nD_x}, \quad f_0 = \frac{D_x t}{nr_0^2}, \quad \bar{r} = \frac{r}{r_0}. \quad (28)$$

Функция R_1 не зависит от времени и характеризует собой стационарное распределение концентрации в рассматриваемой области.

При рассмотрении стационарного случая $R_2 = 0$. Обычно $\nu v/D_x$ велико и можно, используя разложение функции Бесселя K_0 , получить следующее решение стационарной задачи:

$$C_{ст}(x, y) = C_{вх} \sqrt{\frac{r_0}{r}} \exp \left\{ \frac{n}{2D_x} [v_x(x - x_0) + v_y(y - y_0) - v_r(r - r_0)] \right\}, \quad (29)$$

где $v_r = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

Задача 4. Прогноз распространения загрязнения в подземных водах с учетом сорбции при условии, что в водоносный комплекс непрерывно поступает вода с постоянной концентрацией $C_{вх}$.

1. Если кинетика сорбции описывается уравнением (1), то

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \alpha \int_0^t \frac{\partial C}{\partial t} \exp(-\alpha\beta(t - \tau)) d\tau.$$

В этом случае решается следующее уравнение миграции:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} = n \frac{\partial C}{\partial t} + n \alpha \int_0^t \frac{\partial C}{\partial t} \exp(-\alpha\beta(t - \tau)) d\tau \quad (30)$$

при $C(0, x) = 0$, $C(t, 0) = C_{вх}$, $C(t, x) \rightarrow 0$ при $x \rightarrow \infty$.

Для больших и малых моментов времени асимптотическое решение уравнения имеет вид

$$C(t, x) = \frac{1}{2} C_{вх} \left\{ I^{-2\xi \cdot \eta} \operatorname{erfc}(\xi - \eta) + I^{2\xi \cdot \eta} \operatorname{erfc}(\xi + \eta) \right\} I^{(v_x)/(2D)} \quad (31)$$

где для малых моментов времени ($t \leq 0,1/(\alpha\beta)$)

$$\xi = \frac{x}{2 \sqrt{Dt/n}}, \quad \eta = \sqrt{\left(\frac{v^2}{4nD} + \alpha \right) t}; \quad (32)$$

для больших моментов времени ($t \geq 10/(\alpha\beta)$)

$$\xi = \frac{x}{2 \sqrt{Dt\beta/[n(1+\beta)]}}, \quad \eta = \sqrt{\frac{v^2\beta t}{4(1+\beta)Dn}}. \quad (33)$$

При $t \rightarrow \infty$ $C(t, x) \rightarrow C_{вх}$. Это означает, что при постоянном поступлении загрязнений в водоносный комплекс они практически в любой точке достигают такой же концентрации, как и в источнике загрязнений. Но если $\beta \ll 1$, то для хорошо сорбирующихся веществ фронт загрязнения движется медленнее, чем для несорбирующихся веществ.

Зона дисперсии в условиях сорбции

$$L_{д} = 6,6 \sqrt{Dt\beta/n(1+\beta)}, \quad (34)$$

т.е. сорбция приводит к сокращению зоны дисперсии.

2. Если кинетика сорбции описывается уравнением (2), то решается уравнение

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} = n \frac{\partial C}{\partial t} + n\alpha C, \quad t > 0, \quad x > 0, \quad (35)$$

при $C(t, 0) = C_{вх}$, $C(0, x) = 0$, $C(t, x) \rightarrow 0$ при $x \rightarrow \infty$.

Решение этого уравнения определяется по формуле (31) с ξ и η , определенными по формуле (32).

При $t \rightarrow \infty$

$$C(t, x) = C_{вх} \exp \left\{ -\frac{vx}{2D} \left(\sqrt{1 + \frac{4Dn\alpha}{v^2}} - 1 \right) \right\}.$$

Ширина зоны дисперсии, в которой значение концентрации изменяется от $0,99C_{вх}$ до $0,01C_{вх}$, определяется по формуле

$$L_{д} = 9,3D / \left[v \left(\sqrt{1 + \frac{4Dn\alpha}{v^2}} - 1 \right) \right].$$

Координата фронта фильтрации, соответствующая $C = C_{вх}/2$, при $t \rightarrow \infty$ определяется по формуле

$$x_{ср} = 1,4D \left[v \left(\sqrt{1 + \frac{4Dn\alpha}{v^2}} - 1 \right) \right]^{-1}.$$

Задача 5. Прогноз распространения загрязнения в подземных водах с учетом сорбции и конвективной диффузии при нагнетании загрязняющей жидкости в водоносный комплекс.

В каверзно-пористом квазиоднородном пласте, миграция в котором осуществляется за счет вынужденной конвекции, а в слабопроницаемых участках за счет молекулярной диффузии, распространение компонента-загрязнителя при нагнетании загрязняющего раствора описывается уравнением

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{Q}{4\pi r m n} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D r \frac{\partial C}{\partial r} \right),$$

где Q — дебит закачки; m — мощность опробуемого пласта; r — расстояние от скважины.

Рассмотрим два случая: 1) нагнетается загрязняющая жидкость постоянной концентрации C_0 ; 2) нагнетается в скважину жидкость при условии постоянства расхода вещества $Q C_0 = \text{const}$.

Для первого случая имеем решение (7)

$$C(t, r) = C_0 [1 - F_1(v, \lambda)],$$

где

$$v = Q / (4\pi m D n), \quad \lambda = r^2 / (4Dt), \quad f_0 = Dt / r_0^2,$$

$$F_1(v, \lambda) = \frac{1}{r(v)} \int_0^{1/f_0} l^{-z} z^{v-1} dz, \quad D = D / [n(1 + f^1(C))],$$

$f^1(C)$ – усредненное значение первой производной изотермы сорбции (при отсутствии сорбции положим $f^1(C) = 0$).

Для второго случая решение имеет вид (8)

$$C(t, r) = C_0 [1 - F_1(\nu, \lambda) - F_2(\nu, \lambda, \beta)],$$

где

$$F_2(\nu, \lambda, \beta) = \frac{\exp(-4f_0\beta)}{r(\nu)} \int_{1/f_0}^{\infty} 1 - z + \beta/z z^{\nu-1} dz, \quad \beta = \frac{Qr_0(\nu-1)}{4\pi m D^* h r},$$

r_0 – радиус скважины.

Длина зоны дисперсии L_d фронта концентрации вещества при радиальном рассеянии определяется по следующей формуле:

$$L_d \approx \beta \sqrt{Dt/n}.$$

В этой зоне $0,01 \leq C/C_0 \leq 0,99$.

Заключение

С позиций охраны и рационального использования геологической среды подземные воды представляют собой сложную природоохранную систему, характеризующуюся взаимосвязью химических и динамических черт, обусловленных сочетанием внутренних свойств системы с внешними природными факторами, и остро реагирующую на техногенные воздействия.

Гидрогеохимические аспекты охраны геологической среды и рационального ее использования занимают одно из ведущих мест в общей системе природоохранных проблем, поскольку химический состав подземных вод является интегральным относительно природных условий и техногенных преобразований.

Гидрогеохимические аспекты охраны геологической среды и рационального ее использования в крупном плане представлены аспектами, возникающими: 1) при разработке полезных ископаемых, 2) при использовании подземных вод для хозяйственно-питьевых целей, 3) при загрязнении объектов геологической среды, 4) при утилизации промышленных отходов.

Гидрогеохимические аспекты содержат следующую информацию: 1) об изменениях качества подземных вод под влиянием разных видов техногенного воздействия (загрязнения, водоотлива из горных выработок и др.), 2) об изменениях гидрогеологических и инженерно-геологических процессов и явлений под влиянием подземных вод нового техногенного качества (суффозионо-карстовых процессов, прочностных и фильтрационных свойств пород и др.).

Эта информация выражена цепочкой взаимосвязанных и взаимообусловленных параметров. Так, водоотлив из горных выработок и водоотбор для водоснабжения вызывают понижение уровня подземных вод, с которыми связаны нарушения гидродинамического и геохимического режимов.

При нарушении гидродинамического режима либо изменяется характер питания, либо происходит интенсификация инфильтрационного питания через зону аэрации, либо меняется направление движения подземных вод и, как следствие, их подтягивание из других частей того же водоносного комплекса. В первом случае осуществляется подток поверхностных или подземных вод из глубоких водоносных комплексов. Вследствие вновь задействованных физико-химических процессов (смешения, массообмена, кристаллизации) при подтоке глубоких вод формируются воды нового качества — с аномально увеличенной минерализацией, аномальным содержанием хлора, сульфат-иона, жестких, с сульфатной агрессивностью, т.е. формируются воды, характеризующиеся одновременно непригодностью для хозяйственно-питьевых нужд и неблагоприятным влиянием на инженерно-хозяйственную деятельность, а также изменяющие инженерно-геологические процессы и явления. Так, в ходе формирования этих вод на уровне минерализации 0,6–0,8 г/л возрастают прочностные и уменьшаются фильтрационные свойства пород вследствие кристаллизации и выпадения из вод CaCO_3 , CaMgCO_3 ; на участках распространения вод с минерализацией около 2 г/л возрастание прочностных и уменьшение

фильтрационных свойств пород связаны с кристаллизацией CaSO_4 . В то же время воды хлоридного натриевого состава с минерализацией более 1 г/л способствуют развитию в карбонатных породах карстовых явлений вследствие их выщелачивания растворами с повышенной ионной силой. Другой пример: интенсификация инфильтрационного питания способствует формированию вод с карбонатной агрессивностью, что отражается на инженерно-геологических и гидрогеологических явлениях.

Нарушение геохимического режима подземных вод, подверженных техногенному воздействию, сопровождаемое изменением окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условий, определяет возникновение новых процессов (кристаллизации, выщелачивания и др.). Последние вызывают изменения качества вод посредством увеличения суммарной минерализации, возрастания жесткости, агрессивности и т.д.

Большие (по степени и разнообразию) изменения качества подземных вод происходят в пределах гидрогеохимических аномалий смешанного типа; причиной их формирования является, помимо нарушения гидродинамического и геохимического режимов, также еще загрязнение.

Существенное значение для выявления характера развития антропогенных гидрогеохимических аномалий имеет систематика физико-химических процессов в миграционных системах, формирующихся в техногенных условиях. Наиболее распространенными являются следующие миграционные системы и развивающиеся в них процессы:

1) система "загрязненная подземная вода—порода—газ"; процессы выщелачивания — углекислотного, окисления, сернокислотного, а также процессы адсорбции и катионного обмена;

2) система "загрязненная вода—порода"; процессы собственно растворения и растворения растворами с повышенной ионной силой, метасоматического замещения, адсорбции и катионного обмена;

3) загрязненная подземная вода; процессы смешения, кристаллизации, концентрирования.

Большое значение в настоящее время приобрело использование статистики для решения гидрогеохимических, особенно генетических задач в целях прогноза качества подземных вод. К задачам, решаемым на основе статистического анализа, относятся: 1) выявление геохимических типов подземных вод; 2) установление возможных источников компонентного состава подземных вод и процессов перехода их в воду и миграции в водах; 3) установление количественных гидрогеохимических характеристик для подземных вод различных геохимических типов; 4) характеристика подземных вод по формированию жестких и агрессивных подземных вод; 5) пространственное положение подземных вод с различным формированием химического состава и свойств жесткости и агрессивности; 6) прогнозирование формирования минерализации, компонентного состава, свойств жесткости и агрессивности подземных вод.

Для решения этих задач можно успешно использовать относительно несложный статистический аппарат, представленный регрессионным, корреляционным анализами и тренд-анализом. Каждый из них может рассматриваться в качестве самостоятельного метода, позволяющего решать отдельные гидрогеохимические вопросы, однако эффективно их использовать в комплексе.

Одним из центральных приемов решения природоохранных задач с гидрогеохимических позиций является гидрогеохимическое районирование.

Гидрогеохимическое районирование — это разграничение территории по признаку видов и разновидностей подземных вод, характеризующихся общностью формирования химического состава в природно-техногенных условиях и вытекающей отсюда конкретной народнохозяйственной значимостью. Элементарной ячейкой гидрогеохимического районирования с позиций природных условий гидрогеохимического фона формирования техногенных гидрогеохимических аномалий является гидрогеохимический тип геологической среды, характеризующийся присущим ему геолого-гидрогеологическим единством, обеспечивающим его гидрогеохимическую самостоятельность. Геологическая среда подразделяется на ряд гидрогеологических типов, а последние — на подтипы разных порядков. На карте районирования им соответствуют гидрогеохимические районы и подрайоны. На основе гидрогеохимического районирования устанавливаются закономерности формирования техногенных гидрогеохимических аномалий, закономерности их размещения в связи с комплексом природно-техногенных условий и конкретный набор природоохранных мероприятий. Гидрогеохимическое районирование осуществляется на базе картирования. В отличие от картирования, носящего территориальный характер, районирование проводится по территориально-типовому принципу. Целесообразно составлять карты, содержащие информацию, получаемую при картировании и районировании.

Литература

- Алекин О.А. К вопросу о химической классификации природных вод. — *Вопр. гидрохимии*, 1946, вып. 25.
- Алексеев В.В., Эленбоген А.М. О методике выделения комплексных гидрогеохимических аномалий. — В кн.: *Применение гидрогеохимического метода при поисках рудных месторождений*. М., 1974, с. 110—114.
- Ананьев Н.И., Демин Н.Д. К вопросу о распространении загрязнений в подземных водах. — *Санитария и гигиена*, 1971, № 8.
- Бахирева Л.В., Куликова З.В., Терешков Г.М. Основные изменения геологической среды в связи с различными видами строительства. — В кн.: *Геологическая деятельность и охрана окружающей среды*. М.: Изд-во МГУ, 1979, с. 26—30.
- Белицкий А.С. Охрана природных ресурсов при удалении промышленных отходов в недра земли. М.: Недра, 1976, с. 3—137.
- Бочеввер Ф.М., Лапшин Н.Н., Ордовская А.Е. Защита подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1973, с. 3—254.
- Брусиловский С.А. Опыт гидрогеохимического районирования монотонных по химическому составу вод. — В кн.: *Научная отчетная конференция геологического факультета МГУ: Тез. докл.* М., 1966.
- Витвицкий В.В. Экспериментальное исследование физико-химических процессов в гидрогеохимических системах. — В кн.: *Гидрогеохимические исследования при решении проблемы сброса промстоков в терригенные породы кембрия*. М.: Изд-во МГУ, 1978, с. 74—94.
- Гавришин А.И. Математико-статистические методы оценки и контроля качества геологической информации. Новочеркасск, 1979, с. 3—286.
- Гаев А.Я. Промышленные стоки в подземные горизонты. Челябинск, 1978, с. 3—93.
- Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968.
- Гидрогеологические и гидрогеохимические исследования при решении проблемы сброса промстоков в глубоко залегающие карбонатные породы (на примере Куйбышевского Поволжья и Башкирии) / Под ред. К.Е. Питьевой. М.: Изд-во МГУ, 1972, с. 3—346.
- Гидрогеохимические исследования при решении проблемы сброса промстоков в терригенные породы кембрия. М.: Изд-во МГУ, 1978, с. 3—94.
- Гольдберг В.М., Баскаков А.А., Скворцов Н.П. Исследование проницаемости глинистых пород в связи с оценкой их водоупорных свойств при подземном захоронении промстоков. — В кн.: *Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии* / Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 173—177.
- Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных. М.: Мир, 1977, с. 3—569.
- Злобина В.Л., Ковалевский В.С. О возможности применения гелиевой и тритиевой съемки для изучения условий питания подземных вод. — *Вод. ресурсы*, 1980, № 1, с. 166—170.
- Кирюхин В.А., Коротков А.И. Основные задачи региональной гидрогеохимии в связи с охраной недр. — В кн.: *Тез. совещ. "Проблемы региональной гидрогеохимии"*. Л., 1979, с. 136—137.
- Козлова Э.В., Самарин Б.Н., Саргсянц Н.А., Тукалло А.М. Гидрогеохимическая зональность Молдавского артезианского бассейна и распределение токсических компонентов. — В кн.: *Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии* / Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 193—195.
- Конинова Р.С. Криогенные факторы формирования химического состава подземных вод и особенности гидрохимической зональности территории мерзлой зоны. — В кн.: *Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии* / Под ред. К.Е. Питьевой. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 1, с. 119—123.
- Крайнов С.Р., Швец В.М. Основы геохимии подземных вод. М.: Недра, 1980, с. 3—272.
- Крамаренко Л.Е. Микроорганизмы как фактор преобразования химического состава подземных вод. — В кн.: *Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии* / Под ред. К.Е. Питьевой. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 1, с. 113—115.
- Лободин В.А., Суханов В.Ф. К вопросам загрязнения и охраны пресных вод Азово-Кубанского артезианского бассейна. — В кн.: *Проблемы теоретической и региональ-*

- ной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 185—187.
- Пляско В.И., Добровольский Е.В., Филиппов Ю.Ф.* Некоторые вопросы гидрогеохимического обоснования охраны подземных вод от загрязнения проточками. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 207—209.
- Малецка Д.* Влияние интенсивной эксплуатации подземных вод на гидрогеологические условия территорий больших городов. — В кн.: Вопросы гидрогеологии. М.: Изд-во МГУ, 1977, с. 72—79.
- Манихин В.И.* К вопросу о растворимости сульфата кальция при высоких давлениях.— Гидрохим. материалы, 1966, № 41.
- Мартынова М.А., Мартынова Г.И., Часовникова Е.В., Иванов П.И.* Проблема охраны окружающей среды при захоронении жидких промышленных отходов. — В кн.: Тез. совещ. "Проблемы региональной гидрогеохимии". Л., 1979, с. 146—147.
- Мацющик А.* Генетическая классификация гидрогеохимических аномалий. — В кн.: Вопросы гидрогеологии. М.: Изд-во МГУ, 1977, с. 49—55.
- Мацющик А., Питьева К.Е.* Типизация геолого-гидрогеологических условий формирования подземных вод хорошего качества в связи с водоснабжением. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 177—179.
- Мурадов М.О., Валуковис Г.Ю.* Некоторые закономерности гидрогеохимии орошаемых земель. — В кн.: Тез. совещ. "Проблемы региональной гидрогеохимии". Л., 1979.
- Никольский Б.П.* Значение pH для анализа природных вод. — В кн.: Современные физико-химические методы химического анализа. М.: ОНТИ, 1935.
- Ордовская А.Е.* Филтрационное выщелачивание дисперсно-распределенного гипса из песчано-глинистых пород. — В кн.: Растворение и выщелачивание горных пород. М., 1957.
- Ордовская А.Е., Бочеввер О.Ф.* Некоторые закономерности дисперсии и сорбции на грунтах при фильтрации загрязненных подземных вод. — В кн.: Гидрогеологические вопросы подземного захоронения промышленных стоков. М., 1969. (Тр. ВСЕГИНГЕО; Вып. 14).
- Осипов В.И.* Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979, с. 3—215.
- Островский В.Н., Хордикийен М.А.* Процессы формирования химического состава трещинно-карстовых вод в аридных условиях и их изменение под влиянием эксплуатации водозаборов. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 209—213.
- Петров Н.С.* Изменение химического состава природных вод в связи с эксплуатацией хвостохранилищ на фосфорном комбинате. — В кн.: Тез. совещ. "Проблемы региональной гидрогеохимии". Л., 1979, с. 142—143.
- Пиннекер Е.В.* Охрана подземных вод. Новосибирск: Наука, 1979, с. 3—68.
- Питьева К.Е.* Гидрогеохимия. М.: Изд-во МГУ, 1978.
- Питьева К.Е., Орлов М.С., Ильичев В.А.* и др. Задачи гидрогеохимических исследований и проблема охраны окружающей среды. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 159—165.
- Поливанова А.И.* Экспериментальное изучение характера засоления подземных вод солеотвалами и хранилищами промышленных стоков. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 199—201.
- Посохов Е.В.* Общая гидрогеохимия. Л.: Недра, 1975.
- Севастьянова С.К.* Распределение микроэлементов в подземных водах Южного Предуралья. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 135—142.
- Сергеев Е.М.* Современные проблемы и задачи инженерной геологии в свете охраны окружающей среды. — В кн.: Геологическая деятельность и охрана окружающей среды. М.: Изд-во МГУ, 1979, с. 5—14.
- Славянова Л.В., Голицын М.С.* Микрокомпоненты в подземных водах Прикаспийского впадины и прилегающих районов. М.: Недра, 1970, с. 3—165.
- Смирнова А.Я., Бунеева В.Г.* О гидрогеохимических аномалиях грунтовых вод отдельных районов Воронежской области в связи с производственно-хозяйственной деятельностью человека. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 204—207.
- Собакин О.Н.* Особенности гидрогеохимических условий низких пойм в связи с проб-

- лемой охраны сельскохозяйственных угодий от засоления. — В кн.: Тез. совещ. "Проблемы региональной гидрогеохимии". Л., 1979, с. 156—157.
- Сулин В.А.* Условия образования и основы классификации природных вод. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1948.
- Сухарев Г.М., Тарануха Ю.К.* Возможность загрязнения подземных вод в нефтегазоносных районах и мероприятия, связанные с их охраной. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 87—189.
- Тютюнова Ф.И.* Некоторые теоретические аспекты адсорбции и миграционных форм компонентов подземных вод в связи с прогнозом их качества. — Тр. ПНИИИС, 1978, вып. 58, с. 107—128.
- Тютюнова Ф.И.* Современное состояние и основные проблемы геохимии загрязненных подземных вод. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 165—167.
- Хасанов А.С., Умаров К.У.* Проблема охраны подземных вод Узбекистана. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 220—224.
- Чеховских М.А., Кочергина О.Е., Питьева К.Е.* Закономерности распространения титана в подземных водах кристаллических массивов. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 150—155.
- Чечкин С.А., Климов Г.И., Бродская Н.А.* Загрязнение подземных вод предприятиями промышленности фосфорных удобрений. — В кн.: Тез. совещ. "Проблемы региональной гидрогеохимии". Л., 1979, с. 141—142.
- Шагоянц С.А., Приходько В.А., Кондратенко М.П.* и др. Пример решения задачи по защите крупного водозабора от загрязненных подземных вод. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 179—182.
- Шварцева Н.М.* Гидрогеохимические режимные наблюдения для охраны подземных вод. — В кн.: Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии/Под ред. К.Е. Питьевой, С.А. Ковалевской. М.: Изд-во МГУ, 1979, кн. 2, с. 216—220.
- Шестаков В.М.* К теории динамики сорбции при фильтрации в зернистых материалах. — Физ. химия, 1961, № 10.
- Шиманский Л.А., Кунц Э.В.* Мощность зоны пресных вод Пермского Приуралья. — Учен. зап. Перм. ун-та, 1976, вып. 7, № 318.
- Янатьева О.К.* Растворимость в системе $\text{CaCO}_3\text{—MgSO}_4\text{—H}_2\text{O}$ при различных температурах и давлении CO_2 . — Журн. общ. химии, 1955, т. 25, вып. 2.
- Яницкий И.Н.* Гелиевая съемка. М.: Недра, 1979, с. 3—92.
- Anke M., Hennig A., Grün M., Groppe B., Lüdke H.* Cadmium and its influence on plants, animals and man with regard to geological and industrial conditions. — Trace Subst. Environ. Health, 1976, vol. 10, p. 105—111.
- Ashton W.M.* Nickel pollution. — Nature, 1972, vol. 237, p. 46—47.
- Aston S.R., Thornton I., Webb J.S.* Stream sediment composition: An aid to water quality assessment. — Water, Air and Soil Pollut., 1974, vol. 3, p. 321—325.
- Aulenbach D.B., Tofflemire T.J.* Thirty-five years of continuous discharge of secondary treated effluent onto sand beds. — Ground Water., 1975, N 2.
- Aus Industrie und Technik Verbrennungsanlage für radioactive Abfälle und Mull. — Wasser Luft Betr., 1975, N 5.
- Auswirkungen von Chemicalien auf Oberflächen- und Grundwasser. — WWT, 1974, N 2.
- Avotins P., Jenne E.A.* The time stability of dissolved mercury in water samples. II. Chemical stabilization. — J. Environ. Qual., 1975, vol. 4, p. 515—519.
- Back W., Langmuir D.* Influence of near-surface reactions and process on chemical character of ground water: A review of selected experiences in the United States. — In: Commun Congr. Montpellier, 1974. (AIH Mem.; T. 10).
- Bac-Moszaszfili M.* Morawskaa — Struktury Tektoniczne wutworach kredowych niecki warszawskiej i ich związek z dyslokacjami Pooloza. — Acta geol. pol., 1975, vol. 25, N 4.
- Calandra J.C.* Review of EPA's position of the health implications of airborne lead. Chicago: Houston Chem. Co, 1974. 83 p.
- Cameron W.R., Boorde O.H., Leadbetter, McCall G.* A study of the relationship between hypersension school children and trace elements identified in drinking water. — Trace Subst. Environ. Health, 1972, vol. 6, p. 29—37.
- Cameron W.R., Winderlich R.C.* Trace element toxicity associated with public water supply. — Trace Subst. Environ. Health, 1976, vol. 10, p. 25—30.
- Cannon H.* Trace elements excesses and deficiencies in some geochemical provinces of the United States. — Trace Subst. Environ. Health 1969, vol. 3, p. 21—43.

- Cannon H.* The use of plant indicators in ground water surveys, geological mapping, and mineral prospecting. — *Taxon*, 1971, vol. 20, p. 227–256.
- Cannon H.* Natural toxicants of geological origin and their availability to man. — In: *Environmental quality and food supply*, 1974, p. 143–163.
- Chemische produktion und Umweltschutz. — *Wasser-Luft*, 1972, N 2.
- Childs K.E., Uspchurch S.B., Ellins B.* Sampling of variable, waste-migration patterns in ground water. — *Ground Water*, 1974, N 6.
- Cieckiewicz Z., Słaja L.* Składowanie odpadków komunalnych na wysypisku uzadczonym w aspekcie ochrony wód gruntowych. — *Biul. IKS*, 1976, N 6/7.
- Duce R.A., Hoffman G.I.* Atmospheric vanadium transport to the ocean. — *Atmos. Environ.*, 1976, vol. 10, p. 989–996.
- Dyrssen D.W., Uppström L.R.* The boron/chlorinity ratio in Baltic sea water. — *Ambio*, 1974, vol. 1, p. 44–46.
- El-Bassam N., Keppel H., Tietjen C.* Arsenic transfer in soils. — *ESNA Environ. Pollut. Work. Group Abstr. Meet. Cadarache*, 1975, N 1/4.
- Exler H.J.* Ausbreitung und Reichweite von Grundwasserunreinigungen im Unterstrom einer Muldeponie. — *Wasser und Abwasser*, 1972, N 3.
- Feuga B., Vornier I., Sommet A.* Le trace des Perimetres de protection autour des captages d'eau. — *Techn. et sci. munic. et Rev. eau*, 1974, N 4.
- Fischer I.A., Woodford D.L.* Environmental considerations of sanitary landfill sites. II. — *Publ. Works*, 1973, t. 104, N 7.
- Flawn P.T., Turk L.J., Leach C.H.* Geologic considerations in disposal of solid municipal wastes in Texas. — *Circ. Tex. Bur. Econ. Geol.*, 1970, N 70.
- Fleischer M., Sarofim A.F., Fassett D.W.* Environmental impact of cadmium. — *Environ. Health Perspect.*, 1974, vol. 5, p. 253–323.
- Follet R.F., Barber S.A.* Molybdate phase equilibria in soil. — *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 1967, vol. 31.
- Gray R., Heuton M.P.* An investigation into the contamination of groundwater at an industrial tipping site. — *Polid Wastes*, 1975, N 4.
- Greszta J., Godzik S.* Wpływ hutnictwa cynku na gleby. — *Rocz. geolozn.*, 1969, vol. 20, s. 195–214.
- Groth E.* Fluoride pollution. — *Environment*, 1975, vol. 17, p. 29–38.
- Groundwater pollution from subsurface excavations. 1. Pollution from wells. — *Water Well J.*, 1974, N 4.
- Ground water pollution from subsurface excavations. 8. Septic systmes. — *Water Well J.*, 1974, N 11.
- Grove D.B., Beetem W.A.* Porosity and dispersion constant calculations for a fractured carbonate aquifer using the two well tracer method. — *Water Resour. Res.*, 1971, vol. 7, N 1.
- Haberer K.* Trinkwasser in Umweltschutz. 1. Das Wasser und seine Bedrohung. — *Wasser und Abwasser*, 1972, N 10.
- Hakanson L.* Mercury in some Swedish Lake sediments. — *Ambio*, 1974, vol. 3, p. 37–43.
- Halmsted R.L., Finn B.J., MacLean A.J.* Extractability of nickel added to soils and its concentration in plants. — *Canad. J. Soil Sci.*, 1969, vol. 49, p. 335–342.
- Hartung R.* Biological effects of heavy metal pollutants in water. — In: *Metal ions in biological systems*. N.Y.: Acad. press, 1974, p. 161–172.
- Hautge E.* Mülldeponie und Schutz des Grund- und Oberflächenwassers. — *Müll-Abfall-Abwasser*, 1975, Bd. 7, N 1.
- Just J., Maziarska S., Misiakiewicz Z., Wyszyńska H.* Pojazdy samochodowe i rodzaj nawierzchni jezdni jako zrodlo znieczyszczenia powietrza atmosferycznego substancjami rakotworczymi i ołowiem. — *Rocz. PZH*, 1971, vol. 22, s. 545–551.
- Kabata-Pendias A.* Chemiczny skład rozтворów glebowych. — *Rocz. geolozn.*, 1972, vol. 23, s. 3–14.
- Kabata-Pendias A., Piotrowska M.* Calkowite zawartosci mikroelementów w glebach Polski. — *Materiały IUNG, Pulawy*, 1971, vol. 58, s. 7–47.
- Kaiser P.* Festsetzung von Wasserschutzgebieten. — *GWf-Wasser/Abwasser*, 1972, N 1.
- Karvonen M.J.* Air pollution and its effect on health: Heavy metals and hydrocarbons. — In: *Comp. Stud. Food and Environ. Contam.* Vienna: IAEA, 1974, p. 65–74.
- Kaufman W.J.* Chemical pollution of ground waters. — *Amer. Water. Works Assoc. J.*, 1974, N 3.
- Kayser R., Knoch T., Stegmann R., Geisler Chr.* Untersuchungsergebnisse von Sickerwässern aus Muldeponien. — *Gewässerschutz*, 1973, N 10.
- Kazmann R.* Waste surveillance in subsurface disposal projects. — *Ground Water*, 1974, N 6.
- Keller G.* Grundwasserepidemien als Masstab für den Grundwasserschutzbedarf. — *Ztschr. Dt. geol. Ges.*, 1972, Bd. 123, T. 1.
- Keller G.* Schutz des Grundwassers für die Trinkwasserversorgung Bohrtech. — *Brunnen-Bohrleit.*, 1973, N 4.

- Muller H.E. Grundwasserspiegelschwankungen und chemische Veränderungen von Brunnenwässern. — Wasser und Boden, 1971, N 10.
- Neddie B., Gerland G. Dumps a potential threat to ground water supplies. — Water Well J., 1976, N 1.
- Obuchowicz I. Kadm w glebie niektórych okregów przemysłowych. — Roczn. PZH, 1966, vol. 17, s. 318–322.
- Oehler K.E., Laum E. Trinkwasservergiftung. — GWF-Wasser/Abwasser, 1972, N 3.
- Ogata A. Theory of dispersion in a granular medium. — Geol. Surv. Profess. Pap., 1970, vol. 411, pt 1.
- Oleński W. O genezie mineralizacji wód artezyjskich niecki mazowieckiej. — Prz. geol., 1960, vol. 7.
- Ondov J.M., Zoller W.H., Olmez I. Elemental concentrations in the national bureau of standards environmental coal and fly ash standard reference materials. — Anal. Chem., 1975, vol. 47, p. 1102–1109.
- Page A.L., Bingham F.T. Cadmium residues in the environment. — Res. Rev., 1973, vol. 48, p. 1–43.
- Pakkala L.S., White M.N., Lisk D.J. Arsenic content of fish from New York State waters. — Fish and Game J., 1972, vol. 19, p. 12–31.
- Paluch J., Karweta S. Emisja cynku i ołowiu w otoczeniu kombinatu hutniczego i jej oddziaływanie na rośliny i gleby. — Ochr. powietrza, 1970, vol. 4, s. 20–23.
- Pasternak K. Akumulacja metali ciężkich w osadach dennych rzyki Biały Przemysł jako wskaźnik ich rozprzestrzenienia drogą wodną z górniczo-hutniczego ośrodka przemysłu cynku i ołowiu. — Acta hydrobiol., 1974, vol. 16, s. 51–63.
- Survey of cadmium in food. L.: Min. AFF, 1973. 24 p.
- Swaine D.J. Trace elements content of soils. Harpenden: Comm. Agr. Bureau, 1955. 57 p.
- Sweet H.R., Fetrow R.H. Ground-water pollution by wood waste disposal. — Ground Water, 1975, N 2.
- Tardiff R.G. Health standards for metals in drinking water. — In: Semin. Ore. State Univ. Cincinnati (Ohio), 1972, p. 113–139.
- Thews J.D. Summenwirkung von Verunreinigungen in Trinkwasserschutzgebieten. — GWF-Wasser/Abwasser, 1971, N 112.
- Thornton I., Webb J.S. Trace elements in soils and surface waters contaminated by past metalliferous mining in parts of England. — Trace Subst. Environ. Health., 1975, vol. 9, p. 77–88.
- Tosch M. Grundwasserschutz bei geordneter Deponie von Siedlungsabfällen. — Wasserwirt.-Wassertechn., 1973, N 5.
- Trzosinińska A. Hydrological, chemical and physical processes effecting pollution of the Baltic Sea. — In: Proc. Intern. Symp. Marine Pollut. Res. Baton Rouge, 1976, p. 69–79.
- Turner M.A., Rust R.H. Effects of chromium on growth and mineral nutrition of soybeans. — Soil. Sci. Soc. Amer. Proc., 1971, vol. 35, p. 755–758.
- Turski R., Baran S. Zawartość Pb, Zn, Cu, Mn, Bi, Sr różnych typach gleb w rejonie oddziaływania huty cynku-Miasteczko Śląskie. — Zesz. probl. postepow. nauk rol., 1976, z. 179, s. 607–625.
- Zoller W.H., Gladney E.S., Cordon G.E., Bors J.J. Emissions of trace elements from coal fired power plants. — Trace Subst. Environ. Health, 1974, vol. 8, p. 167–172.
- Zuber A. Dyspersja wskaźnika przy przepływach przez ośrodki porowate. — Zesz. nauk. AGH, 1971, z. 7.
- Zwintz R. Grundwasserverunreinigung und Besiedlung in landlichen Raum. — GWF-Wasser/Abwasser, 1972, N 1.

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Методологические основы гидрогеохимических исследований в целях охраны геологической среды	8
1.1. Классификационные приемы обработки гидрогеохимических материалов	8
1.1.1. Классифицирование подземных вод по химическому составу	8
1.1.2. Классификационные приемы общего типа	11
1.2. Решение гидрогеохимических задач с помощью статистических методов	11
1.2.1. Оценка качества гидрогеохимических материалов	11
1.2.2. Решение гидрогеохимических задач простейшими статистическими методами	12
1.2.3. Определение фоновых и аномальных концентраций компонентов в подземных водах	20
1.3. Методика гидрогеохимического картирования в целях охраны геологической среды	24
1.3.1. Методика гидрогеохимического картирования крупных территорий	24
1.3.2. Особенности методики гидрогеохимического картирования территорий городов	33
Глава 2. Гидрогеохимические исследования в связи с охраной подземных вод от загрязнения	36
2.1. Общие положения	36
2.2. Техногенные предпосылки загрязнения подземных вод	37
2.2.1. Типизация загрязнений по составу и источникам	37
2.2.2. Систематика путей поступления загрязнений в подземные воды	44
2.3. Факторы и процессы распространения загрязнений в подземных водах	48
2.3.1. Миграционные системы и внутренние факторы миграции	48
2.3.2. Природные факторы распространения загрязнений в подземных водах	50
2.3.3. Процессы распространения загрязнений в подземных водах	59
2.4. Гидрогеохимические аномалии загрязнения	71
2.4.1. Нормирование качества подземных вод в связи с выявлением аномалий загрязнения	71
2.4.2. Геолого-гидрогеологические условия формирования аномалий загрязнения	75
2.4.3. Гидрогеохимические закономерности аномалий загрязнения	78
2.5. Принципы гидрогеохимического районирования в целях оценки изменения состава подземных вод при загрязнении	87
Глава 3. Исследование изменения качества подземных вод при эксплуатации для водоснабжения	95
3.1. Типизация геолого-гидрогеологических условий формирования химического состава подземных вод хозяйственно-питьевого значения	95
3.2. Определение мощности зоны пресных подземных вод при региональных гидрогеологических исследованиях	104
3.3. Формирование гидрогеохимических аномалий при эксплуатации подземных вод	108
3.4. Гидрогеохимическое районирование в целях прогноза изменения качества подземных вод при региональных гидрогеологических исследованиях	118
Глава 4. Гидрогеохимические аспекты утилизации промстоков путем их подземного захоронения	124
4.1. Геолого-гидрогеологические условия подземного захоронения промстоков	124

4.2. Формирование гидрогеохимических условий под влиянием подземного захоронения промстоков	132
4.2.1. Характеристика состава промстоков	132
4.2.2. Миграционные системы при подземном захоронении промстоков и их пространственное положение	135
4.2.3. Формирование химического состава подземных вод в условиях захоронения промстоков	136
4.3. Гидрогеохимический прогноз подземного захоронения промстоков	150
4.3.1. Геолого-гидрогеологическое обоснование процессов формирования химического состава подземных вод в условиях захоронения промстоков	150
4.3.2. Гидрогеохимический прогноз изменения приемистости промстоков	161
4.3.3. Прогнозное гидрогеохимическое районирование	168
Глава 5. Гидрогеохимические аспекты исследований в инженерно-геологических целях	172
5.1. Общие положения	172
5.2. Формирование геохимических свойств подземных вод, отрицательно влияющих на инженерно-геологические сооружения	173
5.3. Влияние гидрогеохимических процессов на инженерно-геологические свойства пород	180
Глава 6. Прогнозно-охранные мероприятия	194
6.1. Геолого-гидрогеологические основы выделения зон потенциального ухудшения качества подземных вод	194
6.2. Количественный прогноз изменения качества подземных вод	202
Заключение	212
Литература	215

Клара Ефимовна П и т ь е в а
ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ОХРАНЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

*Утверждено к печати
редколлекцией серии
"Современные проблемы биосферы"*
АН СССР

Редактор издательства *Л.П. Ладычук*
Художественный редактор *М.В. Версоцкая*
Технический редактор *А.Л. Шелудченко*
Корректор *В.П. Крылова*

Набор осуществлен в издательстве
на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 28052

Подписано к печати 07.08.84. Т—14628
Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная № 1
Гарнитура Универс. Печать офсетная
Усл.печ.л. 14,0. Усл.кр.-отт. 14,2. Уч.-изд.л. 18,1
Тираж 1200 экз. Тип. зак. 1656
Цена 2 р. 80 к.

Издательство "Наука", 117864 ГСП-7
Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90
Ордена Трудового Красного Знамени
1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ "НАУКА"

готовятся к печати книги:

Карасев М.С., Худяков Г.И. Речные системы (на примере Дальнего Востока). 14 л. 2р. 10к.

Речные системы рассматриваются в монографии как производные гидрогеологических структур, их внешнее выражение. Приводятся фоновые характеристики речной сети (протяженность, густота, гидроморфологический коэффициент) и статические модели речных систем. Определяется строение гидрографической сети как показатель степени пространственной взаимосвязи поверхностных и подземных вод. Выявляются особенности функционирования речных систем и зависимости их основных гидрологических и гидрографических показателей от морфоструктурных условий, закономерности подземного водообмена между горными и равнинными областями.

Для географов, геоморфологов и геологов.

Колебания ледников и процессы моренакопления на Центральном Кавказе. 20 л. 3р.

Монография представляет собой итог многолетних полевых и аналитических исследований, выполненных в соответствии с Международной программой наблюдений за колебаниями ледников. Дана объективная картина изменчивости ледников высокогорного Кавказа по материалам взаимодополняющих методов, главным образом биоиндикационных, геохимических и литоморфологических. Получены конкретные цифровые показатели колебаний ледников во времени и пространстве за последние 700 лет.

Для гляциологов, географов, гидрологов, геологов.

Шешеня Н.Л., Тихвинский И.О. Геологические и зонально-климатические особенности формирования оползней. 9 л. 1р. 40к.

На примере типичных регионов Европейской части СССР установлены и характеризуются регионально-геологические и зонально-климатические особенности формирования и активизации оползневых смещений. Впервые в практике инженерно-геологических исследований для крупных регионов приведен сравнительный анализ тех специфических геологических и климатических условий развития оползневого процесса, которые предопределяют формирование оползней в равнинных, предгорных и горных областях.

Для геоморфологов, гидрологов, геологов.

Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин. 20 л. Зр.

В сборнике представлены материалы исследований, охватывающих практически всю территорию СССР. Приводятся новейшие данные по истории Дона, Волги, Печоры, Пинеги, Лены, Енисея, Алдана и других рек Советского Союза в позднем кайнозое. Рассматриваются погребенные речные долины, ложбины выпахивания, развитые на территории СССР и на шельфах окружающих морей.

Для геологов, географов, геоморфологов.

Заказы просим направлять по одному из перечисленных адресов магазинов "Книга—почтой" "Академкнига":

480091 **Алма-Ата**, 91, Ул. Фурманова, 91/97; 370005 **Баку**, 5, ул. Джапаридзе, 13; 320093 **Днепропетровск**, проспект Ю. Гагарина, 24; 734001 **Душанбе**, проспект Ленина, 95; 252030 **Киев**, ул. Пирогова, 4; 277012 **Кишинев**, проспект Ленина, 148; 443002 **Куйбышев**, проспект Ленина, 2; 197345 **Ленинград**, Петрозаводская ул., 7; 220012 **Минск**, Ленинский проспект, 72; 117192 **Москва**, В-192, Мичуринский проспект, 12; 630090 **Новосибирск**, Академгородок, Морской проспект, 22; 620151 **Свердловск**, ул. Мамина-Сибиряка, 137; 700187 **Ташкент**, ул. Дружбы народов, 6; 450059 **Уфа**, 59, ул. Р. Зорге, 10; 720001 **Фрунзе**, бульвар Дзержинского, 42; 310078 **Харьков**, ул. Чернышевского, 87.

Современные проблемы биосферы

В издательстве "Наука"
готовятся к изданию:

Л.В. Зорин
Эволюция глобального рельефа
и водообмен.
7 л. 1 р. 10 к.

М.С. Карасев, Г.И. Худяков
Речные системы
(на примере Дальнего Востока)
14 л. 2 р. 10 к.

Для получения книг почтой
заказы просим направлять по адресу:
117192 Москва, В-192, Мичуринский проспект, 12
магазин "Книга-почтой"
Центральной конторы "Академкнига"