

Л.Е.Крамаренко

Геохимическое
и поисковое значение
микроорганизмов
ПОДЗЕМНЫХ
ВОД

Л. Е. Крамаренко

Геохимическое
и поисковое значение
микроорганизмов
ПОДЗЕМНЫХ
ВОД

4280



ЛЕНИНГРАД «НЕДРА» ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ 1983



Крамаренко Л. Е. Геохимическое и поисковое значение микроорганизмов подземных вод.— Л.: Недра, 1983.— 181 с.

В книге приведены данные о составе, активности и численности аэробных, факультативных и анаэробных бактерий в подземных водах различных гидрогеологических структур. Показано влияние температуры, степени минерализации, рН на развитие и жизнедеятельность бактерий, населяющих подземные воды, уточнены границы влияния биогенного фактора на геохимические процессы, протекающие в земной коре.

На основе существования тесной взаимосвязи между микроорганизмами и источниками энергии (донорами и внешними акцепторами электронов), заключенными в системе вода—порода, выделена гидробиохимическая зональность земной коры и выявлена специфика микроорганизмов. Подчеркнута важность и необходимость выявления гидробиохимической зональности при изучении гидродинамики, для характеристики условий водной миграции и аккумуляции рудных элементов, при изучении условий формирования, разрушения и сохранения месторождений полезных ископаемых, а также в поисковых целях. Показана роль отдельных групп и видов бактерий в процессах водной миграции и аккумуляции рудных элементов в преобразовании химического состава подземных вод, а также их влияние на условия формирования, сохранения и разрушения месторождений полезных ископаемых.

Работа представляет интерес для специалистов в области региональной и поисковой гидрогеологии, гидрохимии и полезных ископаемых.

Табл. 47, ил. 7, список лит. 75 назв.

Рецензент — канд. геол.-минер. наук *Е. Е. Белякова* (ВСЕГЕИ)

ПРЕДИСЛОВИЕ

В земной коре на геохимические процессы влияют многие факторы, а наиболее значительно два: температура и биогенный фактор. Воздействие температур на геохимические процессы общепризнанно и хорошо изучено. Влияние биогенного фактора, в частности геохимической деятельности микроорганизмов, более широко стало изучаться в 70-е годы.

Работы последних лет в области геологической микробиологии убедительно доказывают, что микроорганизмы играют огромную роль в преобразовании горных пород и минералов. Они участвуют в процессах миграции рудных и нерудных элементов, их рассеяния, концентрации, т. е., по словам В. И. Вернадского, «живые организмы с геохимической точки зрения не являются случайным фактором химической организованности земной коры; они образуют ее наиболее существенную и неотделимую часть. Они неразрывно связаны с косной материей земной коры, с минералами и горными породами» [Очерки геохимии, 1954 г. т. 1, с. 47].

Участие микроорганизмов в геохимических процессах связано с их способностью вовлекать в биохимические окислительно-восстановительные реакции различные химические элементы и соединения, которые для них жизненно необходимы, т. е. используются микроорганизмами в процессе энергетического и конструктивного обмена веществ. Биохимические окислительно-восстановительные реакции, по существу, весьма сходны с химическими реакциями, но имеют и отличительные черты. Катализируемые ферментами, вырабатываемыми живой клеткой, они способны протекать в отсутствие высоких температур, в то время как для осуществления ряда химических реакций требуются высокие температуры. Это обстоятельство имеет исключительно важное значение для понимания сущности многих протекающих в земной коре геохимических процессов.

Под влиянием микроорганизмов в земной коре могут быть образованы вещества, аналогичные тем, которые, по мнению ряда ученых [Кесарев В. В., 1967 г., и др.], поступают в земную кору из глубины планеты и произошли из первичного планетного вещества в результате глубинных высокотемпературных химических процессов. К их числу относятся водород, азот, углекислый газ, метан, сера, сероводород, различные руды.

В настоящее время выделены и в экспериментальных условиях довольно хорошо изучены бактерии, как синтезирующие, так и разрушающие названные вещества.

Геохимическая деятельность микроорганизмов тесно связана с условиями среды их обитания. Условия среды определяют

характер, направленность и масштабы геохимической деятельности микроорганизмов в земной коре. Подземные воды и вмещающие их породы представляют собой благоприятную среду, или экологическую систему, для развития микроорганизмов в недрах Земли. В этой системе микроорганизмы находят на разных глубинах питательные вещества и источники энергии (доноры и внешние акцепторы электронов), необходимые для их жизнедеятельности. Но системе присуще большое разнообразие условий (физико-химических, геологических, гидрогеологических), как стимулирующих, так и лимитирующих бактериальную жизнь в недрах Земли.

Особенности среды обитания бактерий в подземной гидросфере связаны с условиями распространения и формирования подземных вод. Изучение этих условий важно для характеристики геохимических процессов, связанных с жизнедеятельностью микроорганизмов в системе вода—порода.

Настоящая работа посвящена проблеме геохимической деятельности микроорганизмов, обитающих в системе вода—порода земной коры. Цель ее заключается в следующем.

1. Ознакомить читателя с особенностями этой системы как среды для развития и жизнедеятельности микроорганизмов, уточнить границы возможного влияния биогенного фактора на геохимические процессы в земной коре.

2. Показать существование в земной коре гидробиохимической зональности. Подчеркнуть важность и необходимость ее выявления и изучения при выяснении и уточнении положения кислородных границ в различных гидрогеологических структурах, определении условий водной миграции и аккумуляции химических элементов, характеристике условий формирования, сохранения и разрушения месторождений полезных ископаемых.

3. Охарактеризовать роль и значение отдельных физиологических групп и видов бактерий в процессах миграции и аккумуляции рудных элементов, а также их роль в процессах рудообразования (сульфидных руд, бокситов).

4. На примере вод нефтяных и рудных месторождений показать значение микроорганизмов в формировании химического состава подземных вод.

5. Осветить поисковое значение микроорганизмов.

Автором обобщен большой фактический материал, полученный в результате комплексных (микробиологических, гидрогеологических и гидрохимических) исследований подземных вод территории СССР, проводившихся во ВСЕГЕИ. Изучены подземные воды горноскладчатых областей (Алданский шит, Забайкалье, Западный Саян и Западный Танну-Ола, Урал, Кавказ, Сихотэ-Алинь, Казахстан, Чингиз-Тарбагатай и др.) и артезианских бассейнов (Ангаро-Ленский, Якутский, Западно-Сибирский, Волго-Камский, Бухаро-Каршинский, Бадхыз-Карабильский, Сурхандарьинский, Молдавский, Чу-Сарьсуйский, Западно-Туркменский и др.). Для характеристики гидрогеологических и гидрохимических условий в этих регионах использованы материалы Е. А. Баскова, Е. Е. Бе-

ляковой, О. М. Гирфановой, С. В. Егорова, А. В. Зуева, В. А. Кирюхина, Г. И. Климова, Л. Е. Михайлова, В. М. Морозова, Н. А. Петровой, С. Н. Сурикова, В. М. Тарасова, Л. Г. Учителевой, Р. И. Чернышевой, Г. М. Шора.

Из подземных вод и вмещающих воду пород выделялись и изучались микроорганизмы с разными биохимическими функциями. Это были представители аэробной, факультативно-анаэробной и анаэробной микрофлоры, биогеохимическая деятельность которой связана с превращениями углерода, азота, серы, рудных элементов. Экспериментально исследована геохимическая деятельность микроорганизмов, обитающих в подземных водах. Некоторые эксперименты выполнялись при непосредственном участии Е. Е. Беляковой, Н. А. Бродской, Е. З. Бурьяновой, Н. П. Никитиной, И. И. Призреновой, О. Ф. Сафоновой, И. Н. Шарыхиной. Результаты проведенных автором полевых и лабораторных работ с учетом данных других исследователей позволили выявить ряд закономерностей, имеющих научное и практическое значение.

Автор выражает свою признательность за консультации и помощь в работе И. К. Зайцеву, Е. Е. Беляковой, Е. А. Баскову.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МИКРООРГАНИЗМАХ

По своему положению в природе микроорганизмы относятся к третьему царству живых существ — протистам. Протисты в отличие от животных и растений морфологически слабо дифференцированы, большинство из них одноклеточные. На основании особенностей строения клеток протисты разделяются на две группы: высшие (или эвкариоты), куда входят водоросли, грибы и простейшие, и низшие (или прокариоты), к которым относятся бактерии и сине-зеленые водоросли.

Прокариоты рассматриваются «как реликтовые формы, сохранившиеся с древних времен, а появление эвкариотических форм (развившихся из прокариотических) как гигантский скачок в эволюции организмов». [60, с. 14].

Клетки прокариотов (бактерий) одеты плотной оболочкой (клеточная стенка), которая придает им постоянную форму (шарообразную, палочковидную, вибриона или спирали). Клетки заполнены цитоплазмой. Слой цитоплазмы, прилегающий к клеточной стенке, уплотнен и образует цитоплазматическую мембрану, которая выполняет очень важную физиологическую функцию. Она обладает избирательной проницаемостью и регулирует поступление веществ в клетку, т. е. является осмотическим барьером клетки (рис. 1).

В центральной части бактериальной клетки локализовано ядерное вещество — дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК), — которое распределено диффузно (обособленного ядра, как в клетке растений и животных, у бактерий нет).

В цитоплазме бактериальной клетки находится плотное тельце, от которого отходит жгутик — орган движения. Жгутиковые бактерии развивают скорость до 200 мкм/с. Бактерии, не имеющие жгутиков, способны медленно (5 мкм/с) двигаться по поверхности твердого субстрата. Некоторые бактерии образуют споры, которые являются приспособлением для перенесения неблагоприятных условий (высушивание, высокие температуры). Оболочка споры многослойная и труднопроницаемая. Невысокая влажность в спорах предохраняет белки от денатурации. В благоприятных условиях споры прорастают.

Размножаются бактерии делением. Время генерации (промежуток времени между образованием клетки и делением ее на две дочерние) разное, что зависит от ряда факторов: свойств самих бактерий, питательной среды, температуры, возраста культуры и т. п. Даже при оптимальных условиях время генерации колеблется от 20 мин до нескольких часов.

Питание бактериальной клетки происходит путем диффузии различных химических соединений окружающей среды через

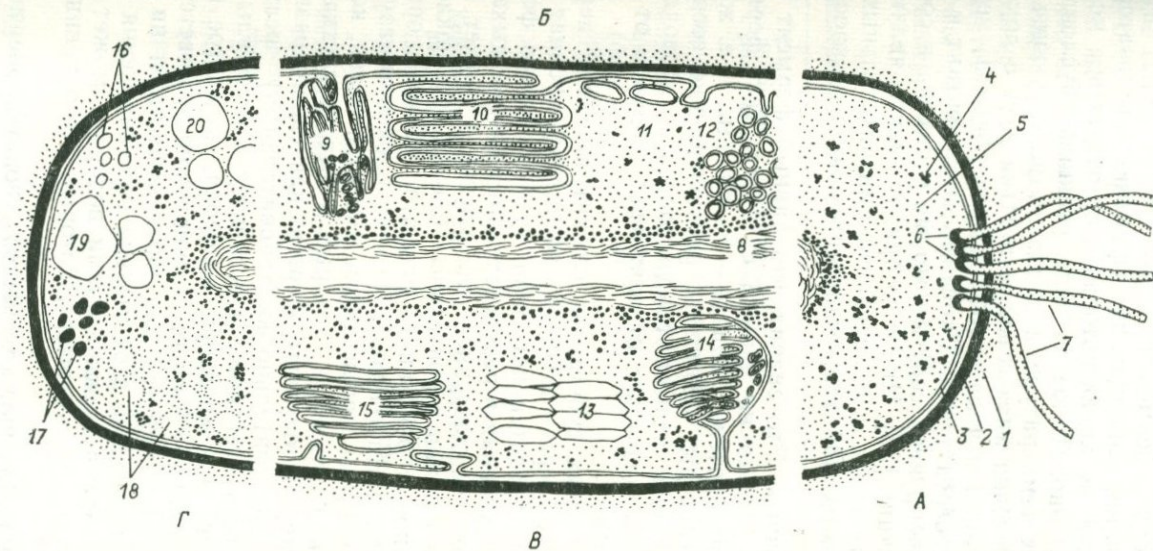


Рис. 1. Схематический разрез бактериальной клетки — прокариота, комбинированный для фотосинтезирующих и нефотосинтезирующих микроорганизмов (по Г. Шлегелю [1972 г.]).

А — основные структуры клетки: 1 — капсула, 2 — клеточная стенка, 3 — цитоплазматическая мембрана, 4 — рибосомы, 5 — цитоплазма, 6 — базальные тельца, 7 — жгутики;

Б — фотосинтезирующие мембранные структуры: 8 — ядерное вещество, 9 — трубчатые тилакоиды, 10 — пластинчатые тилакоиды, 11 — везикулы, 12 — везикулы или хромофоры;

В — нефотосинтезирующие мембранные структуры: 13 — газовые вакуоли, 14 — мезосомы, 15 — ламеллярные структуры;

Г — включения запасных веществ: 16 — капли жира, 17 — полифосфаты, 18 — гранулы полисахаридов, 19 — полигидромасляная кислота, 20 — включения серы.

наружную оболочку. Некоторые минеральные соли быстро диффундируют и легко поступают внутрь клетки, но крупные молекулы (полисахариды, протеины и др.) должны быть расщеплены или гидролизованы, прежде чем они могут быть усвоены. Этот процесс осуществляется с помощью ферментов.

Ферменты — это белки, выполняющие функцию катализаторов, ускоряющих химическую реакцию, которая в их отсутствие может протекать очень медленно. Такое течение реакции обусловлено тем, что при обычных температуре и давлении реагирующие вещества не могут достаточно близко соприкоснуться друг с другом, а для того чтобы реакция началась (обмен электронами), между ними должен быть непосредственный контакт. Этот контакт и создают ферменты, адсорбируя на себе некоторые вещества и соединяя их в процессе реакции [36]. Иначе говоря, ферменты являются транспортными механизмами, т. е. переносчиками питательных веществ и энергии, необходимой для жизнедеятельности микроорганизмов.

Ферменты специфичны. Это значит, что данный фермент способен воздействовать только на данный субстрат. Так, фермент протеаза действует на протеин, липаза — на липиды, т. е. жиры, карбогидраза — на углеводы. Ферменты, расщепляющие соединения при помощи гидролиза, называются гидролазами, проводящие прямое окисление — оксидазами, а отщепляющие водород от субстрата — дегидрогеназами.

Расщепление различных субстратов служит клетке в первую очередь для получения энергии АТФ (аденозинтрифосфорная кислота). Это соединение представляет собой ту химическую форму, в которой энергия, полученная в результате фотосинтеза, дыхания, или брожения, становится доступной для клетки и может быть использована ею для синтеза строительных блоков (аминокислот, пуриновых и пиридиновых оснований, фосфатов сахаров, органических кислот и прочих метаболитов). Из этих блоков образуются полимерные макромолекулы (нуклеиновые кислоты, белки, компоненты клеточной стенки и т. п.), из которых и состоит клетка.

Большинство бактерий получают энергию для своего развития из окислительных (окислительно-восстановительных) реакций, когда атомы водорода и электроны переносятся с молекулы субстрата, обозначаемой как донаторы водорода, на другое вещество — акцептор водорода. Каждому окислению соответствует эквивалентное восстановление тех или иных веществ, и ни одно окисление не может проходить в отсутствие восстановления окислителя. Между донаторами и акцепторами водорода может быть ряд переносчиков водорода — веществ, которые легко принимают и отдают водород.

Известно, что самое большое количество усвояемой энергии выделяется в том случае, если водород непосредственно окисляется газообразным кислородом, превращаясь в воду, т. е. при аэробном дыхании (аэробные бактерии). При отсутствии свободного кислорода микроорганизмы используют энергию, получаемую при

анаэробном дыхании. В этом случае акцептором водорода и электронов служит связанный кислород в форме нитратов, сульфатов, углекислоты (анаэробные бактерии). Энергия, необходимая для развития бактерий, может быть также получена в процессе брожения (ферментации) органического вещества при полном отсутствии свободного и связанного кислорода. Функции донаторов и акцепторов водорода при этом выполняют различные части одной и той же молекулы органического вещества.

По способам добывания энергии, а также по потребностям в конструктивных материалах, т. е. по характеру метаболизма (обмена веществ), выделяется четыре группы бактерий: 1) фотосинтетики автотрофы (фотолитотрофия); 2) хемосинтетики автотрофы (хемолитотрофия); 3) фотосинтетики гетеротрофы (фотоорганотрофия); 4) гетеротрофы (хемоорганотрофия, табл. 1).

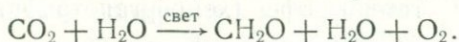
Таблица 1

Классификация бактерий по характеру их обмена (по С. И. Кузнецову [1970 г.]

Группа	Организмы (тип обмена)	Окисляемый субстрат	Источник энергии	Источник углерода	Организмы
1	Фотосинтетики автотрофы (фотолитотрофия)	Минеральные вещества	Свет	CO ₂	Зеленые растения, Chlorobacteriaceae (зеленые серобактерии). Thiobacteriaceae (пурпурные серобактерии)
2	Хемосинтетики автотрофы (хемолитотрофия)	То же	Реакция окисления неорганических веществ	CO ₂	<i>Hydrogenomonas, Thiobacillus, Nitrosomonas, Nitrobacter</i>
3	Фотосинтетики гетеротрофы (фотоорганотрофия)	Органические вещества	Свет	CO ₂ и органические вещества	Athiorhodaceae (несерные пурпурные бактерии)
4	Гетеротрофы (хемоорганотрофия)	То же	Окислительно-восстановительные реакции при окислении органических веществ	Органические вещества	Животные и большинство микроорганизмов, исключая водоросли

Автотрофы (фотосинтетики и хемосинтетики) строят составные части своей клетки исключительно из углекислоты и минеральных солей. Для этого они используют энергию света или окисления неорганических веществ. Фотосинтетики имеют пигменты, улав-

дивающие энергию света, которые мало отличаются по своему строению от хлорофилла растений. Однако если растения в качестве донаторов водорода используют воду, то для бактерий, имеющих лишь одну пигментную систему, требуются донаторы с более высокой степенью восстановления, такие как сероводород и другие не вполне окисленные соединения серы. Бактериальный фотосинтез протекает в анаэробных условиях и не сопровождается выделением кислорода. Реакция протекает согласно уравнению $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$. Вместе с тем существуют микроорганизмы (сине-зеленые водоросли), называемые сейчас цианобактериями, или сине-зелеными бактериями, которые обладают двумя пигментными системами. Благодаря этому их фотосинтез протекает с образованием кислорода согласно реакции



Некоторые фотосинтезирующие бактерии в качестве донаторов водорода используют органические вещества (фотосинтетики — гетеротрофы). Представителями фотосинтезирующих бактерий являются пурпурные серные (Thiorhodaceae), несерные (Athiorhodaceae), зеленые (Chlorobiaceae), а также цианобактерии (*Anabaena cylindrica*, *A. variabilis*) [22].

Хемосинтезирующие бактерии восстанавливают углекислоту, необходимую для синтеза клеточного вещества за счет энергии, получаемой в процессе окисления неорганических веществ.

Известны следующие реакции, энергия которых может быть использована автотрофными хемосинтезирующими бактериями.

1. $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + 56\,000$ кал.
2. $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 195\,000$ кал.
3. $\text{NH}_3 + 1\frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 73\,000$ кал.
4. $\text{HNO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{HNO}_3 + 17\,000$ кал.
5. $\text{H}_2\text{S} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{S} + \text{H}_2\text{O} + 41\,000$ кал.
6. $\text{S} + \text{H}_2\text{O} + 1\frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{H}_2\text{SO}_4 + 118\,000$ кал.
7. $2\text{FeSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O} + 19\,000$ кал;
 $4\text{FeCO}_3 + \text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} = 4\text{Fe}(\text{OH})_3 + 4\text{CO}_2 + 40\,000$ кал.
8. $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 62\,000$ кал.
9. $4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 = \text{CH}_3 - \text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} + 18\,600$ кал.
10. Квант (энергия красного света) = 40 000 кал [36].

Гетеротрофные бактерии энергию для общего обмена получают за счет окисления органических веществ. К гетеротрофным относится большинство бактерий, существующих в природе. Есть бактерии, которые способны переходить от автотрофного образа жизни к гетеротрофному. Вследствие этого не всегда удается провести четкую грань между автотрофами и гетеротрофами. Микроорганизмы, использующие углекислоту в автотрофных процессах, а органическое вещество в гетеротрофных, называются миксотрофами. К числу миксотрофов относятся водородные бактерии, некоторые виды тионовых.

По отношению к воздуху микроорганизмы разделяются на две резко различные группы.

1. Строгие аэробы, не растущие при отсутствии воздуха.

2. Obligатные анаэробы, для которых воздух ядовит.

Есть бактерии, которые занимают промежуточное положение. Это либо индифферентные по отношению к кислороду бактерии, либо факультативные формы, растущие как в присутствии воздуха, так и без него.

«Бактерии — древнейшая группа организмов на Земле и кроме гипотетических предков других у них нет, а все остальные живые существа могут быть отнесены к бактериям как потомки» [Заварзин Г. А., 1979 г., с. 18].

При рассмотрении последовательности эволюции микроорганизмов с момента их появления на Земле предполагается, что прежде всего развитие получила «гетеротрофная жизнь», источником углерода и энергии для которой служили органические соединения, накопившиеся в водоемах в восстановительной атмосфере. Это были, вероятно, организмы, существовавшие за счет брожения и обладавшие функциями анаэробного обмена. Под влиянием таких микроорганизмов сложные органические вещества разлагались до CO_2 , NH_4 , простых органических кислот, которые могли подвергаться обратным превращениям [60, 72].

Поскольку в то время не было на Земле ни сульфатов, ни нитратов, а сера и азот находились только в восстановленном состоянии, то следующий этап органической эволюции заключался, очевидно, в использовании энергии света. В этот период получил развитие бескислородный бактериальный фотосинтез, за счет которого произошло увеличение содержания серы по схеме $\text{CO}_2 +$

$+ 2\text{H}_2\text{S} \xrightarrow{\text{свет}} \text{CH}_2\text{O} + 2\text{S}$. В создавшихся новых условиях могла возникнуть способность организмов использовать воду как донатор водорода для автотрофной ассимиляции CO_2 . Это неизбежно должно было привести к выделению кислорода по схеме $\text{CO}_2 +$

$+ 2\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{свет}} \text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$.

Первыми организмами, которые могли производить фотосинтез в соответствии с приведенными уравнениями, были, очевидно, цианобактерии, обладавшие соответствующими ферментами и способные больше, чем другие микроорганизмы, выживать в вышеуказанной среде [60, 72]. В процессе параллельного развития от фототрофных бактерий могли произойти бактерии, использующие для дыхания сульфаты, нитраты, а затем и бактерии, осуществляющие аэробное дыхание.

Находки остатков бактериальных организмов начиная с отложений возраста 3100 млн. лет на разных стратиграфических уровнях докембрия датируют время их возникновения и начало развития [Вологдин А. Г., 1976 г.]. Некоторые из живущих в настоящее время бактерий являются, возможно, реликтовыми формами, уцелевшими до наших дней от раннего периода биологической эволюции. Они либо сохраняют старый образ жизни в каких-то крайних условиях, либо нашли для себя новые экологические ниши [60, 72].

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРООРГАНИЗМОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Присутствие микроорганизмов в подземных водах установлено впервые в 1926 г. одновременно русскими и американскими исследователями [Гинзбург-Карагичева Т. Л., 1926 г.; 65]. С тех пор появилось большое число публикаций, посвященных микрофлоре подземных вод. К их числу относятся работы Э. А. Рейнфельд [1933 г.], Т. Л. Гинзбург-Карагичевой [1936 г., 1947 г.], О. Ю. Волковой [1946 г.], Л. Д. Штурм [1950 г.], Л. К. Оснишской [1954 г., 1958 г.], З. А. Колесник [1955 г.], С. И. Кузнецова [1955 г., 1962 г.], Т. Л. Смаковой и др. [50, 55], Л. Е. Крамаренко [24—31], Л. Е. Крамаренко, И. И. Призреновой и др. [32, 33], Е. Е. Беляковой и др. [2, 8], Е. Н. Дутовой [1956 г., 1961 г.], З. И. Кузнецовой [37, 1957 г., 1959 г., 1963 г.], М. С. Гуревича [1958 г.], И. К. Норенковой (Вороновой) [1959 г., 1966 г.], М. Е. Альтовского и др. [1958 г., 1962 г.], В. А. Кузнецовой [1960 г., 1964 г.], И. К. Сазоновой [1961 г.], К. Б. Аширова [1961 г.], З. П. Телегиной [1961 г.], В. Л. Мехтневой [1962 г.], М. В. Иванова [18], Г. А. Заварзина, Т. Н. Жилиной [1964 г.], Е. Н. Розановой [1964 г., 1971 г.], Г. М. Троновой [1976 г.], Н. М. Прокофьевой, Л. Е. Крамаренко [51], Т. В. Крашениниковой [1979 г.], А. А. Оборина и др. [1979 г.], Т. Н. Назиной, Е. П. Розановой [1980 г.] и других исследователей.

В результате исследований, проведенных в различных районах Советского Союза (Кавказ и Предкавказье, Украина, Эмбинская нефтеносная область, Второе Баку, Западная и Восточная Сибирь, Урал, Казахстан, Средняя Азия и др.), установлено, что обитающая в подземных водах микрофлора жизнедеятельна, активна и представлена различными физиологическими группами и видами бактерий.

В подземных водах обнаружены следующие физиологические группы бактерий: аммонифицирующие, нитрифицирующие, тионовые, водородокисляющие, метанокисляющие, окисляющие нефтяные углеводороды, денитрифицирующие (гетеротрофы и миксотрофы), сульфатвосстанавливающие, водородпродуцирующие, метанобразующие и др. (табл. 2).

Аммонифицирующие бактерии. Представлены различными видами из родов *Bacillus* (*Bac. mesentericus*, *Bac. megatherium*), *Pseudomonas* (*Ps. fluorescens*) и др. Они разлагают белки и переводят органический азот в минеральный. Распад белка сопровождается образованием аминокислот. Последние подвергаются дальнейшему дезаминированию, в результате которого образуются аммиак и органические кислоты. В аэробных условиях образующиеся кислоты могут подвергнуться полному окислению и в конечном итоге превратиться в CO_2 и H_2O .

В результате анаэробного распада белковых веществ, называемого гниением, образуются углекислота, органические кислоты, индол, скатол, меркаптан, сероводород и аммиак.

Нитрифицирующие бактерии. Превращают аммиак в нитрат. В этом процессе участвуют главным образом бактерии двух родов: *Nitrosomonas*, окисляющие соли аммония до нитритов, и *Nitrobacter*, окисляющие нитриты до нитратов. Эти два рода бактерий строго специализированы в отношении указанных реакций. Бактерии, окисляющие аммиак, обеспечивают субстратом бактерии, окисляющие нитрит. Так как высокие концентрации аммиака в щелочных средах оказывают на *Nitrobacter* токсическое действие,

Nitrosomonas, используя аммиак и образуя кислоту, т. е. переводя катион в анион, создают благоприятные условия для существования *Nitrobacter*.

Нитрифицирующие бактерии играют в природе существенную роль. Перевод катиона в анион вызывает подкисление почвы, что ведет к повышению растворимости минералов, в состав которых входят соли калия, магния, кальция и фосфорной кислоты. Поэтому в нитрифицирующей микрофлоре видели ранее важный фактор плодородия почвы.

Теперь взгляды изменились и нитрификация рассматривается не столько как условие, сколько как показатель плодородия. В настоящее время общепризнанно, что азот аммония усваивается растениями и микроорганизмами лучше, чем азот нитратов. Следовательно, важно установить форму минерального азота, которая лучше сохраняется в почве [13].

Тионовые бактерии. Представляют единую в морфологическом и биохимическом отношении группу. Все они способны использовать энергию окисления восстановленных соединений серы в серную кислоту для ассимиляции углерода, построения клеточного тела и всех остальных функций. Сера внутри клеток не откладывается. Тионовые бактерии относятся к роду *Thiobacillus*. Виды рода различаются в основном их отношением к энергии, кислотности среды и др. Выделяются строгие автотрофы и миксотрофы, бактерии, способные и неспособные окислять соли закисного железа, растущие и не растущие в кислой среде, развивающиеся и не развивающиеся в присутствии нитратов и др.

В литературе описаны следующие виды тионовых бактерий: *Thiobacillus «у»*, *T. thiooxydans*, *T. coproliticus*, *T. novellus*, *T. intermedius*, *T. perometabolis*, *Thiobacillus A₂*, *T. organoparus*, *T. ferrooxidans*, *T. thiooxydans*, *T. thioparus*, *T. denitrificans*, *T. trautweinii*. Ключ к определению тионовых бактерий дается в работах Г. А. Заварзина [13], Г. И. Каравайко, С. И. Кузнецова и А. И. Голомзика [19], Г. И. Каравайко, Н. Н. Ляликовой, Т. А. Пивоваровой [62].

Thiobacillus «у» — мелкая палочка, размером $0,5 \times (0,8 \div 1)$ мкм. Вид выделен Н. Н. Ляликовой [1967 г.] на минеральной среде с Sb_2S_3 .

Способен окислять сульфид сурьмы Sb_2S_3 , галенит PbS и висмутит Bi_2S_3 . Отличается от других автотрофов тем, что окисляет сульфиды при нейтральной реакции. Оптимальное для развития $pH = 7,5 \div 8,5$, пределы 5—9,5.

T. thiooxydans — мелкая подвижная палочка размером $0,3 \times (0,5 \div 1)$ мкм, строгий автотроф. Окисляет тиоцианаты по следующей схеме: $NH_4CNS + 2O_2 + 2H_2O \rightarrow (NH_4)_2SO_4 + CO_2$. Кроме тиоцианата эти бактерии могут окислять тиосульфат, серу и сероводород до сульфата. Оптимум развития отмечается при нейтральной реакции.

T. coproliticus — длинные тонкие палочки размером $(0,1 \div 0,2) \times (6 \div 8)$ мкм, подвижные. Факультативный автотроф, аэроб.

Физиологические группы и виды бактерий	Источники энергии		Источник угле-рода
	Донор электронов	Акцептор элект-ронов	
Аммонифицирующие:			
<i>Bacillus mesentericus</i>	Органическое вещество (белок)	O ₂	Органическое вещество
<i>Bac. megatherium</i>	То же	"	То же
Нитрифицирующие:			
<i>Nitrosomonas</i>	NH ₃ /NH ₄	"	CO ₂
<i>Nitrobacter</i>	NO ₂ ⁻	"	"
Тионовые:			
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	Fe ²⁺ , S ⁰ , сульфиды	"	"
<i>T. thiooxidans</i>	S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻	"	"
<i>T. thioparus</i>	H ₂ S, S, S ₂ O ₃ ²⁻	"	"
<i>T. denitrificans</i>	S, S ₂ O ₃ ²⁻	NO ₃ , O ₂	CO ₂ , органическое вещество
Водородокисляющие — <i>Hydrogenomonas facilis</i>	H ₂ , органическое вещество	O ₂	CO ₂ , органическое вещество
Метаноокисляющие — <i>Pseudomonas methanica</i>	CH ₄	"	CH ₄
Денитрифицирующие (гетеротрофы):			
<i>Pseudomonas denitrificans</i> , <i>Ps. fluorescens</i>	Органическое вещество	NO ₃ , O ₂	Органическое вещество
Сульфатовосстанавливающие — <i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	Органическое вещество H ₂	SO ₄ "	Органическое вещество CO ₂
Водородпродуцирующие — <i>Clostridium</i>		Органическое вещество	
Метанобразующие — <i>Methanobacterium formicicum</i>	H ₂	CO ₂	CO ₂

водах, и осуществляемые ими биохимические реакции (примеры)

Типы реакций	Основные продукты реакций
$R-CHNH_2COOH + O_2 \rightarrow R-COOH + CO_2 + NH_3$	NH ₃ , CO ₂
То же	То же
$NH_4^+ + 1/2O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$	NO ₂
$NO_2^- + 1/2O_2 \rightarrow NO_3^-$	NO ₃
$4FeSO_4 + 2H_2SO_4 + O_2 \rightarrow 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O$	SO ₄ ²⁻ , Fe ³⁺
$S + H_2O + 1/2O_2 = H_2SO_4$	H ₂ SO ₄ ²⁻
$2H_2S + O_2 = 2H_2O + 2S^0$	S ⁰ , сульфаты
$5S + 6KNO_3 + 4NaHCO_3 = 3K_2SO_4 + 2Na_2SO_4 + 4CO_2 + 3N_2 + 2H_2O$	N ₂ , сульфаты, нитриты
$H_2 + 1/2O_2 = H_2O$	H ₂ O
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	CO ₂ , H ₂ O
$4KNO_3 + 5CH_2O \rightarrow 2K_2CO_3 + 3CO_2 + 5H_2O + N_2$	CO ₂ , N ₂ , NH ₃ , NO ₂ ⁻
$2C_3H_5O_3Na + MgSO_4 \rightarrow 2CH_3COONa + CO_2 + MgCO_3 + H_2S + H_2O$	H ₂ S, CO ₂
$4H_2 + H_2SO_4 \rightarrow H_2S + 4H_2O$	H ₂ S
—	H ₂
$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	CH ₄

Оптimum развития отмечается при нейтральной реакции, пределы рН от 4,0 до 10,0.

T. novellus — клетки короткие, неподвижные, почти кокковидные. Хорошо растет на органическом веществе, слабо — на средах с тиосульфатом. Оптимальное для развития рН=8÷9, при рН<6 эта бактерия не растет.

T. intermedius — клетки в виде палочек размером $0,5 \times (1 \div 2)$ мкм. На среде с тиосульфатом хорошо растет. При добавлении органических веществ скорость роста увеличивается. Оптимальное для развития рН=4,0, пределы от 1,9 до 7,0.

T. perometabolis — клетки в виде палочек размером $0,5 \times (1 \div 2)$ мкм. Не способен к автотрофному росту. Хорошо растет на минеральных средах при добавлении органических веществ. Оптимальное для развития рН=6,9, пределы 2,8—8,0.

Thiobacillus A₂ — клетки короткие, почти кокковидные, размером $(0,5 \div 0,7) \times (1,1 \div 1,8)$ мкм. Хорошо растет на органических средах. Автотрофный рост возможен только на среде с $S_2O_3^{2-}$. Оптимальное для развития рН=8,45, пределы 5,5—9,5.

T. organoparus — клетки в виде короткой палочки с округленными концами, подвижные. *T. organoparus* развивается автотрофно на элементарной сере подобно *T. thiooxidans* и одновременно способен полностью переключаться с автотрофного обмена на гетеротрофный и наоборот, чем и отличается от *T. thiooxidans*. *T. organoparus* развивается в кислой среде при рН от 1,5 до 4,5. Этот вид микроорганизма является истинным обитателем сульфидных месторождений и принимает участие в процессах окисления сульфидных минералов — пирита и халькопирита [62].

При микробиологическом исследовании подземных вод нами основное внимание уделялось видам *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans*, *T. denitrificans* и *T. trautweinii*, оказавшимся наиболее распространенными в подземных водах.

T. ferrooxidans — короткая палочка размером $(0,3 \div 0,4) \times (0,7 \div 1,7)$ мкм с одним полярным жгутиком. Этот вид — строгий аэроб и строгий автотроф, впервые выделен А. Р. Кольмером и М. Хинклем [69] из кислых дренажных вод шахт, пройденных в битуминозных углях. Этот микроорганизм хорошо изучен Н. Н. Ляликовой [1966 г., 1968 г.] *T. ferrooxidans* активно развивается только при кислой реакции среды. Оптимальное для развития рН=1,8÷3,5, пределы 1,5—4,8. Однако в подземных водах *T. ferrooxidans* встречается при значениях рН, намного превышающих те, которые установлены в лабораторных условиях. Этот организм обнаружен нами в нейтральных и даже щелочных водах, но в малоактивном состоянии [28]. В настоящее время доказано, что образование кислых шахтных вод связано с жизнедеятельностью *T. ferrooxidans* [31, 46, 69]. В качестве источника энергии *T. ferrooxidans* использует $FeSO_4$, S^0 , $S_2O_3^{2-}$, $S_4O_6^{2-}$, S^{2-} , $S_2O_4^{2-}$, SO_3^{2-} , а также различные сульфидные минералы.

Особенно значительна роль *T. ferrooxidans* в окислении за-

кислого железа. Этот процесс бактериального окисления двухвалентного железа идет настолько энергично, что был запатентован в США в 1958 г. для получения сернокислого окисного железа в технологии выщелачивания цветных металлов из руд [19].

Д. Т. Лацей и Ф. Лаусон [Lacey D. T., Lawson F., 1970 г.], изучая кинетику окисления FeSO_4 в оптимальных для развития *T. ferrooxidans* условиях (избыток кислорода, двуокиси углерода, температура 31 °С, рН=2,2), рассчитали, что названный микроорганизм при непрерывном окислении может окислять Fe^{2+} со скоростью, приблизительно в 500 000 раз большей, чем скорость химического окисления закисного железа [19]. Микроорганизму *T. ferrooxidans* принадлежит ведущая роль в окислении сульфидов.

T. thiooxidans представляет собой палочку размерами $(0,5 \div 0,8) \times (1,0 \div 1,2)$ мкм с одним полярным спиралевидным жгутиком. *T. thiooxidans* — строгий аэроб, весьма чувствительный к недостатку кислорода в среде. Он способен развиваться в сильно-кислой среде при рН от 0,6 до 5,5 (оптимум рН=2,5) [36]. *T. thiooxidans* может накапливать в среде до 5—7 % серной кислоты. Источником энергии для *T. thiooxidans* служит окисление молекулярной серы. Из сульфидов тяжелых металлов *T. thiooxidans* окисляет антимонит [19].

4280
Существуют мутанты и экологические варианты *T. thiooxidans*, отличающиеся от основного вида формой колоний, их отношением к источникам азота, к рН, окислению тиосульфата [13]. Экологические варианты *T. thiooxidans*, хорошо растущие на среде с тиосульфатом, часто встречаются в подземных водах, связанных с сульфидным оруденением. В присутствии последнего они активно развиваются не только в кислых, но и в слабокислых, нейтральных и даже слабощелочных водах. Адаптируясь к неблагоприятным для своего развития значениям рН, этот организм не утрачивает способности развиваться в кислой среде и подкислять ее до низких значений рН, что имеет определенное геохимическое и поисковое значение [28]. Микроорганизм *T. thiooxidans* играет важную роль в сернокислотном выветривании серных месторождений, что убедительно доказано исследованиями С. И. Кузнецова и др. [1962 г.], М. В. Иванова [18] и Г. И. Каравайко [1961 г.], проводившимися на различных серных месторождениях Советского Союза (Гоурдакское, Шор-Су, Раздольное).

T. thioparus имеет форму палочки с закругленными концами размером $(0,5 \div 0,8) \times (0,9 \div 1,4)$ мкм с одним полярным жгутиком. В чистую культуру впервые выделен М. В. Бейеринком (Beijerinck M. W., 1904 г., 1912 г.). *T. thioparus* — щелочелюбивый микроорганизм. Оптимальные значения рН для роста разных штаммов колеблются от 8,5 до 9,8. При начальном рН=4,5÷5,0 бактерии не развиваются [19]. При ослабленной аэрации, т. е. в микроаэрофильных условиях, они развиваются интенсивнее. Нитраты как источник кислорода *T. thioparus* не использует. Источником

энергии для *T. thioparus* могут служить сероводород, элементарная сера, тиосульфат, тетрагидрат, сульфид кальция.

Основной геохимической деятельностью *T. thioparis* является окисление сероводорода до молекулярной серы. Этот микроорганизм, обитающий в сероводородных подземных водах, где создаются микроаэрофильные условия, играет ведущую роль в процессах образования эпигенетических месторождений серы [18].

T. trautweinii — мелкая подвижная палочка размером $0,5 \times (1 \div 2)$ мкм с 6—8 жгутиками, факультативный аэроб. В анаэробных условиях восстанавливает нитраты до нитритов или газообразного азота. На среде с тиосульфатом окисляет его до тетрагидрата. Процесс идет с подщелачиванием среды. *T. trautweinii* хорошо растет на органических средах. Этот микроорганизм входит в состав биоценозов, свойственных подземным водам сульфидных месторождений, где косвенно участвует в окислении сульфидов [28].

T. denitrificans. Под этим названием существуют, по-видимому, два различных микроорганизма.

1. *T. denitrificans*, выделенный Р. Лиске [Lieske R., 1912 г.] К. и К. С. Баальсрудами [63], — строгий автотроф. Это мелкая палочка — $(0,4 \div 0,5) \times 1$ мкм — с одним полярным жгутиком. Присутствие органических веществ (солей уксусной, масляной, янтарной кислот, а также сахаров или аминокислот) угнетает их рост. Оптимальное для их развития $pH = 6,0 \div 8,0$. Этот организм, по данным К. и К. С. Баальсрудов, очень чувствителен к нитритам. При добавлении в среду 0,003 % KNO_2 процесс задерживается на 40 %, а при добавлении 0,03 % полностью приостанавливается.

2. *T. denitrificans*, выделенный М. В. Бейеринком [Beijerinck M. W., 1904 г.] и М. В. Тюльпановой-Мосевич [1930 г.], — миксотроф, хорошо развивающийся на обычном мясо-пептонном агаре (МПА). При автотрофном росте в качестве источника энергии использует элементарную серу и тиосульфаты. Выделенный М. В. Бейеринком штамм представляет собой очень подвижную палочку, имеющую 6—8 жгутиков.

В подземных водах обитает, как показали наши исследования, в основном миксотрофный вид *T. denitrificans*. Он хорошо растет как на МПА, так и на минеральных средах, содержащих молекулярную серу или гипосульфит. По морфологическим признакам аналогичен виду, выделенному М. В. Бейеринком.

Характерной биохимической особенностью вида *T. denitrificans*, обитающего в подземных водах, является то, что при развитии на минеральных средах с серой (или тиосульфатом) этот организм не всегда в первой генерации доводит процесс денитрификации до газообразного азота. Чаще процесс идет только до нитритов, количество которых в разных культурах варьирует в широких пределах от 10 до 180 мг/л. Однако в дальнейшем при последующих пересевах, т. е. во второй и в третьей генерациях, способность образовывать N_2 бактериями легко приобретает и закрепляется.

Причем скорость, с которой эта способность приобретает, зависит от количества первоначально образованных в среде нитритов.

Быстрее образуется N_2 , когда содержание NO_2^- в культурах не превышает 100 мг/л. При большем количестве нитритов газообразование задерживается. Предполагалось, что данные бактерии также чувствительны к нитратам, как и бактерии, выделенные К. и К. С. Баальсрудами. Однако специально проведенные опыты показали, что токсическое действие нитритов в наших культурах носит временный характер, так как инактивация нитратредуцирующего фермента бактерий оказалась обратной [32].

Выделенные нами денитрифицирующие, окисляющие серу бактерии даже после длительного контакта с высокими концентрациями в среде нитритов (до 300 мг/л) при разбавлении последних оказались способными к денитрификации с образованием газообразного азота. Более того, активные формы миксотрофных денитрифицирующих бактерий способны к денитрификации при полной замене нитратов нитритами. Денитрификация протекала при концентрации 500—2500 и отсутствовала при концентрации 5000 мг/л NO_2^- [32].

Способность выделенных бактерий образовывать биогенный азот за счет восстановления нитритов представляется важной для объяснения условий их распространения и геохимической деятельности в подземных водах, где нитратов нет, а нитриты присутствуют. Такие условия создаются при анаэробном разрушении нефти, где вследствие распада азотсодержащих компонентов нефти и лизиса бактериальных тел нитриты, согласно данным В. М. Богдановой [1959 г.], накапливаются в значительных количествах.

Активизированные частыми пересевами миксотрофные денитрифицирующие бактерии очень быстро (за 47—60 ч) завершают процесс денитрификации (среда Бейеринка+сера) с образованием биогенного азота. Нитриты при этом в среде не накапливаются (рис. 2).

Миксотрофные виды денитрифицирующих, окисляющих серу бактерий широко распространены и активны в подземных водах сульфидных месторождений. Опыты показали, что они осуществляют денитрификацию с вовлечением в этот процесс пирита и молибдена [32].

Водородокисляющие бактерии (микроорганизмы с газовым питанием). Способны расти за счет энергии реакции окисления молекулярного водорода кислородом. Морфологически гидрогеномонады (род *Hydrogenomonas*) относятся к неспороносным подвижным палочкам с округлыми концами, с сильно варьирующими размерами. Среди микроорганизмов, окисляющих водород, наиболее изучены *Hydrogenomonas eutropha*, *H. facilis* и *Micrococcus denitrificans* [13]. Последний организм обладает способностью развиваться в анаэробных условиях, используя кислород нитратов

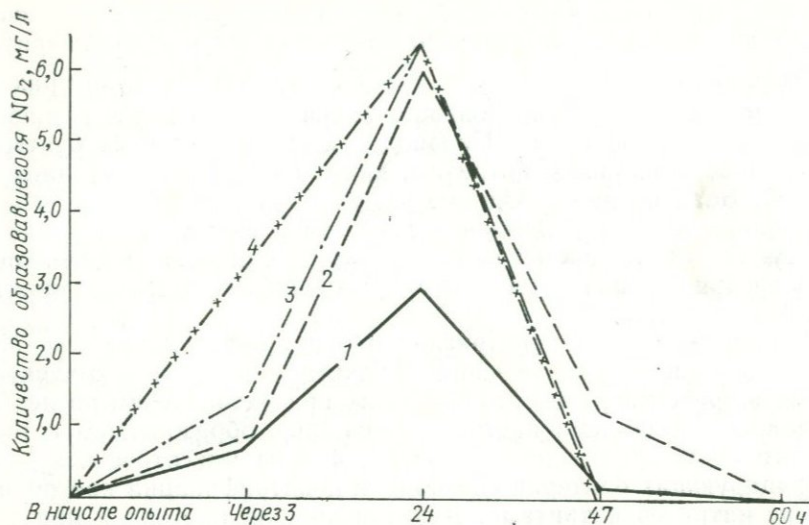
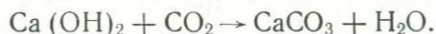
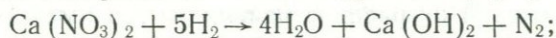


Рис. 2. Динамика процесса денитрификации на среде Бейеринка с серой.

1—4 — культуры бактерий, выделенные из подземных вод.

для окисления водорода согласно следующим формулам [36]:



Все водородные бактерии являются миксотрофами, способными расти как в автотрофных условиях, используя энергию окисления водорода, так и на обычных питательных средах, как гетеротрофы. Рост водородных бактерий в автотрофных условиях — это наиболее типичный пример роста организмов с газовым питанием, которые получают основные вещества из растворенных в воде газов. В отличие от таких организмов, как метаноокисляющие, водородные бактерии не образуют углекислоты, основной продукт их обмена — вода [13].

Метаноокисляющие бактерии. Группа метаноокисляющих бактерий включает в себя большое число различных микроорганизмов. Среди них выделяются облигатные окислители метана (и метанола), т. е. те, которые не могут использовать ни высшие углеводороды, ни органические кислоты, ни сахара или белки, и факультативные, окисляющие не только метан, но и другие вещества. Представителем первой группы является микроорганизм *Pseudomonas methanica*, второй — *Bacterium methanicum*, *Mycobacterium flavum* var. *methanicum* и др. [36].

К. Е. Зо-Белл [1950 г.] указал на важное значение метаноокисляющих бактерий для сохранения углерода в почве. Энергичное выделение метана другими бактериями быстро привело бы к обогащению атмосферы огромными количествами его, если бы не деятельность метаноокисляющих бактерий. Этот автор высчитал,

что бактерии на одном квадратном метре верхнего слоя почвы толщиной в один сантиметр могут окислять до 100 мг метана в год [Бирштехер Э., 1957 г., с. 156].

Бактерии, окисляющие высшие нефтяные углеводороды. Окисление высших нефтяных углеводородов осуществляется в основном бактериями из рода *Pseudomonas* [50, 52, 55].

Эти бактерии более чем бактерии других групп приспособлены к использованию жидких легкокипящих *n*-алканов (C_5 — C_{10}) и ароматических углеводородов [52]. Являясь факультативными анаэробами, они способны существовать в микроаэрофильных условиях.

Бактерии, окисляющие высшие нефтяные индивидуальные углеводороды (гексан, гептан, октан, нанан), парафин, нафтеновые кислоты, входят в состав биоценозов, участвующих в процессах вторичного преобразования нефтей [50, 52].

Денитрифицирующие бактерии — гетеротрофы. Так же как и миксотрофы (*T. denitrificans*), они осуществляют переход азота из нитратов в газообразную форму N_2 , но источником энергии для них служит не сера, а органическое вещество. Основными представителями этой группы бактерий являются *Pseudomonas denitrificans* и *Ps. fluorescens*.

Денитрифицирующие бактерии — факультативные анаэробы, обладающие двумя окислительно-восстановительными системами: дыхательной, в которой акцептором водорода служит кислород воздуха, и восстанавливающей нитраты. Процесс денитрификации протекает в две фазы: 1) восстановление нитратов до нитритов; 2) восстановление нитритов до свободного азота.

Рассматриваемые бактерии широко распространены в подземных водах. В пластовых водах нефтяных месторождений они, по-видимому, могут развиваться в отсутствие нитратов за счет сбраживания органического вещества нефти [52, 55].

Сульфатвосстанавливающие бактерии. Это облигатные анаэробы, восстанавливающие сульфаты до сероводорода. Способность бактерий образовывать сероводород путем восстановления сульфатов впервые установлена в 1893 г. Н. Д. Зелинским и Е. М. Брусилловским. С тех пор эта группа бактерий изучалась многими исследователями и по-разному классифицировалась. Согласно последней классификации Дж. Р. Постгейта и Л. Л. Кемпбл [Postgate J. R., Campebell L. L., 1966 г.], все сульфатвосстанавливающие бактерии по способности к спорообразованию делятся на два рода: спорообразующие — *Desulfotomaculum* (*D. nigrificans*, *D. orientis*) и неспорообразующие — *Desulfovibrio* (*D. desulfuricans* — галофильный вид, но который можно адаптировать к пресной воде, *D. desulfuricans* var. *azotovorans* — способный усваивать газообразный азот, *D. vulgaris*, *D. salexigenes* — облигатный галофил, развивающийся при содержании в среде 2,5—5 % NaCl, *D. gigas* — спироилл, *D. africanus* — длинная изогнутая палочка, развивающаяся при значительном содержании соли в культуре) [36]. К настоящему времени выделены новые виды сульфатвосстанавливающих бактерий [52].

Сульфатвосстанавливающим бактериям присущи следующие типы обмена: анаэробное дыхание и анаэробное сбраживание органических субстратов в отсутствие SO_4^{2-} (сопряженное окисление—восстановление). В процессы анаэробного дыхания вовлекаются водород и различные органические вещества (молочная, пировиноградная, яблочная, муравьиная, щавелевая кислоты, этанол, бутанол, глицерин, изобутанол и другие спирты). Сбраживание протекает в присутствии пирувата, фумарола, малата. Сульфатвосстанавливающие бактерии (*D. desulfuricans*), окисляя молекулярный водород, превращают в сульфид такие вещества, как сульфат, сульфит, тиосульфат, тетратит.

Способность чистых культур бактерий осуществлять редукцию сульфатов за счет углеводов нефти не установлена. Однако в комплексе с другими микроорганизмами сульфатвосстанавливающие бактерии активно осуществляют этот процесс [24, 50, 52, 55]. В опытах с накопительными культурами сульфатвосстанавливающих бактерий [24], где присутствовала сопутствующая микрофлора, интенсивность сульфатредукции обеспечивалась индивидуальными углеводородами, в частности нонаном C_9H_{20} .

Согласно данным В. М. Горленко и В. А. Кузнецовой [1966 г.], редукция сульфатов активно протекает в присутствии нефти, если в составе биоценоза наряду с сульфатвосстанавливающими бактериями развиваются углеводородокисляющие бактерии. Распад нефти с участием рассматриваемых бактерий приводит к выделению углекислоты, нарушению карбонатного равновесия и выпадению кальцита, который закупоривает нефтяную залежь [Аширов К. Б., Сазонова И. В., 1962 г.].

В симбиозе с другими микроорганизмами сульфатвосстанавливающие бактерии участвуют в процессах вторичного преобразования нефтей [50]. Большую роль они играют при сингенетическом и эпигенетическом рудообразовании [4, 25, 26, 70, 73, 74, 75; Baas-Becking L. q., 1961 г.].

Водородпродуцирующие бактерии. Данные о микроорганизмах — продуцентах водорода систематизированы в работе [56]. По Е. Н. Кондратьевой и И. Н. Гогову, способность выделять молекулярный водород проявляют микроорганизмы следующих систематических групп:

- 1) строгие анаэробы, растущие за счет процессов брожения;
- 2) факультативные анаэробы, способные к брожению и дыханию в аэробных условиях;
- 3) строгие анаэробы, осуществляющие так называемое анаэробное дыхание;
- 4) фототрофы.

Представители первой группы сбраживают с выделением H_2 сахара, органические и аминокислоты, пурины и пиридин. Некоторые виды разлагают с выделением H_2 и полимерные соединения: крахмал, декстрин, пектин, клетчатку, белки. К ним принадлежат многие виды из рода *Clostridium*. Особенно в большом ко-

личестве H_2 выделяют представители так называемых сахаролитических клостридиев, осуществляющих маслянокислое брожение углеводов. Так, *Clostridium butyricum* при сбраживании 1 моля глюкозы образует до 2 молей и даже более H_2 [23].

Брожение, осуществляемое бактериями второй группы — факультативно-анаэробными микроорганизмами, — характеризуется большим набором продуктов жизнедеятельности, а также существенным изменением их соотношений и состава в зависимости от сбраживаемых субстратов и других условий среды.

К третьей группе водородпродуцирующих организмов относятся сульфатвосстанавливающие бактерии, отдельные представители которых способны расти на средах, не содержащих сульфатов и других окисленных соединений серы, но содержащих пируват, фумарат или малат.

Четвертая группа бактерий — это фототрофы: пурпурные серные и несерные бактерии, а также сине-зеленые водоросли, называемые сейчас цианобактериями. Пурпурные бактерии, имеющие одну пигментную систему и использующие в качестве доноров водорода не воду, а восстановленные соединения серы или органические вещества, выделяют водород только в анаэробных условиях на органических средах.

Выявленные нами из подземных вод водородпродуцирующие бактерии относятся к анаэробам, растущим за счет брожения углеводов, в частности глюкозы. Значительное количество глюкозы образуется, согласно исследованиям А. А. Имшенецкого [1953 г.], в процессе жизнедеятельности целлюлозоразлагающих бактерий. Так, в среде с 2 % клетчатки, по данным названного автора, чистые культуры целлюлозоразлагающих бактерий накапливали от 40 до 74 % редуцированных сахаров по отношению к разложившейся клетчатке.

Эти данные важны для характеристики возможных условий существования и жизнедеятельности водородпродуцирующих бактерий в природной обстановке. В условиях, где имеется клетчатка (целлюлоза), могут развиваться и проявлять свою геохимическую деятельность не только целлюлозоразлагающие, но и водородпродуцирующие бактерии.

По данным К. Е. Зо-Белла [Zo Bell C. E., 1947 г.], водородпродуцирующие бактерии широко распространены в морских осадках, содержащих нефть. Большое количество их разновидностей было найдено К. Е. Зо-Беллом в донных отложениях Тихого океана.

Метанобразующие бактерии. Условно разделяются на две группы: 1) бактерии, способные образовывать метан только из водорода и углекислоты или же из соединений, превращающихся в водород и углекислоту, и 2) бактерии, способные помимо водорода использовать для образования метана органические соединения — уксусную кислоту, формиат, ацетат или метанол и др. [13]. Бактерии обеих групп являются строгими анаэробами, быстро погибающими при контакте с кислородом. Сложные поли-

мерные вещества, а также углеводы, доступные для обычных типов брожения, они не используют.

По возрастающей способности к использованию органических веществ для образования метана Г. А. Заварзин [13] выделяет:

1) бактерии, использующие только водород и превращающиеся в него вещества (СО, формиат): *Methanobacterium formicum*, *M. ruminantium*, *M. mobilis*, *Methanococcus vannielii*;

2) бактерии, которые кроме водорода используют уксусную кислоту (иногда и масляную): *Methanobacterium soehngenii*, *Methanosarcina methanica*, *Methanococcus mazei*;

3) бактерии, использующие кроме водорода и уксусной кислоты метанол — *Methanosarcina barkerii*;

4) бактерии, которые используют различные органические кислоты. Однако организмы этой группы не были получены в чистой культуре и не исключена возможность, что приписываемая им химическая активность — результат совместного действия нескольких организмов.

Работами последних лет установлено, что все известные теперь виды метанобразующих бактерий способны развиваться в чистых культурах только за счет энергии анаэробного окисления молекулярного водорода. Акцептором электронов служит углекислота [62]. Использование спиртов и кислот, иных чем метанол, формиат и ацетат, в культурах неочищенных метанобразующих бактерий осуществляется при участии спутников [52].

Широкое распространение бактерий, образующих метан в осадочных отложениях земной коры, где известны значительные его скопления и отсутствуют условия для его термokatалитического образования, все чаще заставляет геохимиков привлекать микробиологические процессы к объяснению генезиса углеводородных газов в подземных водах и в промышленных залежах [62].

Метанобразующие бактерии обнаружены С. С. Беляевым [1979 г.] в пластовых водах четвертичных и плиоценовых отложений Прикаспийской впадины. Современное микробиологическое образование метана упомянутый автор связывает с деятельностью этих микроорганизмов. В водах, как и в осадочных породах, более 80 % метана сформировалось по реакции восстановления СО₂. Энергетическим субстратом для бактерий, вероятно, служил молекулярный водород, возникающий при анаэробном разрушении органических веществ.

$\delta^{13}\text{C}$ метана, растворенного в пластовых водах исследованных районов, составляла от $-64,2$ до $-93,8$ ‰, что подтверждает его микробиологическую природу.

Проведенные исследования и имеющиеся геохимические данные позволяют считать метанобразующие бактерии основным источником метана в толще неоген-четвертичных отложений. При этом не исключается возможность поступления некоторого количества глубинного газа.

Прогнозные запасы газа плиоценовых отложений этой зоны, судя по предварительным данным, весьма значительные. При этом

отмечается, что существующая гидрогеохимическая обстановка благоприятна для формирования и сохранения газовых залежей.

Гетеротрофы, растущие на МПА. Не являются какой-либо таксономически обособленной группой бактерий. На МПА развиваются бактерии с разнообразными биохимическими свойствами. Они обладают способностью усваивать углерод и азот из белковых соединений и в этом отношении имеют сходство с аммонифицирующими бактериями. Многие из рассматриваемых бактерий способны усваивать кроме белковых и другие органические вещества, например органические кислоты, спирты. Они могут быть углеводородокисляющими. На МПА растут также некоторые виды тионовых бактерий, являющиеся миксотрофами.

Геохимическая деятельность растущих на МПА гетеротрофов слабо изучена. Известно, что при окислении органических веществ гетеротрофные бактерии образуют различные органические кислоты (щавелевую, лимонную, винную, яблочную, глютаминовую, фульвокислоты и др.), которые являются активными кислотообразователями — хелатизаторами [Сушкина Н. Н., Цюрупа И. Г., 1973 г.].

Работы последних лет показывают, что гетеротрофы, растущие на МПА, способствуют переходу в раствор золота, меди, марганца и других рудных элементов [62, Ляликова Н. Н., Мокеичева Л. Я., 1969 г., Парес И., 1968 г.]. По общему количеству бактерий на чашках Петри с МПА судят об общей бактериальной заселенности подземных вод.

Таким образом, метаболизм (обмен веществ) и биохимические свойства вышеописанных физиологических групп и видов бактерий характеризуются большим разнообразием. Благодаря этому бактерии могут принимать участие во многих окислительно-восстановительных процессах, протекающих в известной, по В. И. Вернадскому, системе вода—порода—газ—живое вещество.

В биохимический процесс в качестве источников энергии (доноров и внешних акцепторов электронов) вовлекаются многие органические и минеральные вещества, заключенные в породах и подземных водах, в том числе и вещества, составляющие месторождения полезных ископаемых. Под влиянием микроорганизмов эти вещества либо окисляются, либо восстанавливаются.

В процессе жизнедеятельности вышеописанных бактерий затрагивается баланс углерода, азота, серы, рудных элементов. При этом образуются CO_2 , CH_4 , NO_3^- , NO_2^- , N_2 , NH_3 , H_2 , H_2S , SO_4 ; металлы переходят из одной валентности в другую.

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КАК СРЕДА ДЛЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ

Осуществляя разнообразные химические реакции, микробы как живые существа проявляют свою деятельность только в условиях, обеспечивающих жизнь. Поэтому при исследовании геохимической деятельности микроорганизмов, обитающих в подземных водах, необходимо изучать не только биохимические свойства, но и условия среды обитания бактерий.

Подземные воды — наиболее благоприятная экологическая среда для развития и жизнедеятельности микроорганизмов в условиях земной коры. Во-первых, вода сама по себе играет ведущую роль во всех жизненных процессах, во-вторых, в ней растворены и находятся в наиболее усвояемой форме многие органические и минеральные вещества, необходимые для жизни бактерий.

Подземные воды весьма разнообразны по химическому, газовому составу, температуре и другим показателям, в связи с чем в системе вода—порода создаются условия, как стимулирующие, так и лимитирующие бактериальную жизнь. Среди различных факторов, способных влиять на развитие и жизнедеятельность бактерий в подземных водах, выделяются прежде всего физико-химические: температура, минерализация воды, величины рН, Eh и др. Определенную роль играет ионный и газовый состав подземных вод, в формировании которого участвуют сами микроорганизмы. Для развития и активной геохимической деятельности отдельных физиологических групп и видов бактерий важны также источники энергии и питания в форме определенных органических соединений для гетеротрофов и минеральных веществ для автотрофов, а также источники кислорода, от форм которых зависит развитие аэробных и анаэробных бактерий и т. д.

Все эти факторы (физико-химические, энергетические) тесно связаны и зависят от условий распространения и формирования подземных вод. Согласно И. К. Зайцеву и Н. И. Толстихину [15], они определяются взаимодействием сложного комплекса геологических и физико-географических факторов, проявившихся в течение длительной геологической истории развития отдельных участков земной коры. Основными факторами являются геологическое строение и геоструктурные особенности отдельных регионов, фации, вещественный состав и коллекторские свойства пород, глубина залегания и степень изоляции водоносных горизонтов от дневной поверхности, гидродинамические и геотермические режимы соответствующих участков земной коры, а также современная физико-географическая обстановка (климат, рельеф и др.), определяющая условия питания и дренирования водоносных пород.

Температура подземных вод изменяется в широких пределах: от отрицательных значений в районах многолетней мерзлоты до нескольких сотен градусов тепла в условиях, где вода переходит в пар. В земной коре встречаются следующими подземные воды.

		$t, ^\circ\text{C}$
Сверххолодные	Ниже	0—1
Холодные	До	20
Теплые	До	35
Слабогорячие	До	50
Горячие	До	70
Весьма горячие	До	100
Сверхгорячие (перегретые)	Свыше	100

По степени минерализации подземные воды подразделяются на три группы с рядом подгрупп (табл. 3). Показатели Eh подземных вод изменяются от +1000 до —350 мВ и ниже. Значения рН подземных вод также различны. В соответствии со значениями рН, зависящими от концентрации H^+ , природные воды подразделяются на кислые, слабокислые, нейтральные, слабощелочные и щелочные (табл. 4).

Таблица 3

Схема подразделения природных вод по степени минерализации (по И. К. Зайцеву и Н. И. Толстихину [1972 г.]

Группы вод	Наименование вод по степени их минерализации (подгруппы)	Минерализация, г/кг
Пресные (менее 1 г/кг)	Сверхпресные	Менее 0,01
	Пресные	До 0,1
	Особо пресные	0,1—1,3
	Нормально пресные	0,3—0,5
	Пресноватые	0,5—1,0
Соленые (от 1 до 35 г/кг)	Слабосоленоватые	1,0—3,0
	Среднесоленые	3,0—10,0
	Сильносоленые	10,0—35,0
Рассолы (свыше 35 г/кг)	Весьма слабые	35—70
	Слабые	70—140
	Крепкие	140—270
	Весьма крепкие	270—350
	Сверхкрепкие	Свыше 350

Таблица 4

Значения рН воды в зависимости от концентрации H^+ (по О. А. Алекину, [1952 г.]

Показатели	Реакция					
	Кислая			Слабокислая		
$[\text{H}^+]$, г-ион	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
рН	1	2	3	4	5	6

Показатели	Реакция							
	Нейтральная	Слабощелочная			Щелочная			
[H ⁺], г-ион	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴
pH	7	8	9	10	11	12	13	14

Главнейшими ионами в природных водах являются Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ (катионы), Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻ (анионы). Эти ионы составляют основную часть всей минерализации природной воды. Их происхождение связано с почвами и породами.

В результате взаимодействия подземных вод с породами воды обогащаются и многими другими элементами (микроэлементами). Согласно данным Е. Е. Беляковой [44], большинство литофильных (Li, Be, B, F, Mg, Al, Mn, Sr и др.), халькофильных (Cu, Zn, Pb, Cd, Ag, Sb и др.), сидерофильных (Fe, Ni, Co, Mo и др.), атмофильных (H, N, Ar, He и др.) и биофильных (C, H, O, N, P, S и др.) элементов обнаружено в настоящее время в природных водах.

В подземных водах содержатся также различные газы: кислород O₂, углекислый газ CO₂, азот N₂, метан CH₄, тяжелые углеводородные газы (этан C₂H₆, пропан C₃H₈, бутан C₄H₁₀), водород H₂, сероводород H₂S, аргон Ar и гелий He.

Химический состав подземных вод принято выражать формулой Курлова, представляющей собой дробь, в числителе которой указывается содержание в процент-эквивалентной форме главнейших анионов, а в знаменателе — соответственно содержание катионов. Часто к формуле Курлова добавляют данные по газам и температуре. В результате чего она имеет следующий вид:

$$CO_2M_6 \frac{HCO_3^- 83Cl^- 15}{(K + Na) + 89Ca^{2+} 7Mg^{2+4}} t.$$

По характеру минерализации выделяются воды гидрокарбонатные, сульфатные, хлоридные натриевые, кальциевые и магниевые при условии, если один из указанных анионов или катионов составляет значительно больше 50 % от суммы анионов или катионов в миллиграмм-эквивалентной форме, а также воды, смешанные по анионам и катионам, если содержание одного из компонентов больше 50, а второго больше 25 % от суммы анионов (катионов).

Формула Курлова отражает название вод следующим образом:

$$M_{0,2} \frac{HCO_3 86Cl 13}{Ca 69 (Na + K) 19Mg 12} \text{ — вода гидрокарбонатная кальциевая;}$$

$$M_{0,3} \frac{HCO_3 52Cl 28SO_4 20}{(Na + K) 51Ca 44Mg 5} \text{ — вода хлоридно-гидрокарбонатная, кальциево-натриевая;}$$

$M_{2,2} \frac{SO_4 46 Cl 32 HCO_3 22}{Ca 38 (Na + K) 37 Mg 24}$ — вода, смешанная по анионам и катионам;

$M_{0,6} \frac{HCO_3 54 SO_4 32 Cl 14}{Ca 44 Mg 33 (Na + K) 23}$ — вода сульфатно-гидрокарбонатная, смешанная по катионам.

Основываясь на свойствах природных вод как растворителей, Е. Е. Белякова [44] классифицирует подземные воды по соотношению в них концентраций анионов сильных и слабых кислот и сильных и слабых катионов, а также по их ионной силе μ , которая является функцией этих соотношений. Для вод первых от поверхности земли водоносных горизонтов и комплексов ею выделены следующие химические типы вод:

неметаморфизованные $\left(\frac{rSO_4^{2-} + rCl^-}{rHCO_3^- + rHSiO_3^-} \leq 0,5; \mu < 0,006 \right)$, начальной метаморфизации $\left(\frac{rSO_4^{2-} + rCl^-}{rHCO_3^- + rHSiO_3^-} = 0,5 \div 4; \mu 0,01 \div 0,004 \right)$, средней метаморфизации $\left(\frac{rSO_4^{2-} + rCl^-}{rHCO_3^- + rHSiO_3^-} = 4 \div 60; \mu 0,05 \div 0,2 \right)$, высшей метаморфизации $\left(\frac{rSO_4^{2-} + rCl^-}{rHCO_3^- + rHSiO_3^-} \geq 60; \mu > 0,2 \right)^*$.

Скопления подземных вод в земной коре приурочены к разным геологическим структурам. Основными структурами являются артезианские бассейны и гидрогеологические массивы [Зайцев Н. К., Басков Е. А., 1972 г.]. Артезианские бассейны — это гидрогеологические структуры, которые приурочены к синеклизам платформ, предгорным и передовым прогибам, межгорным впадинам и другим геологическим структурам, выполненным преимущественно осадочными породами, сравнительно слабодислоцированными, содержащими пластовые (поровые, трещинные, карстовые) скопления подземных вод.

В геологической истории артезианских бассейнов различаются седиментационные (субаквальные) и инфильтрационные (субазральные) этапы их формирования. Седиментационные этапы связаны с процессами накопления осадочных толщ в субаквальных условиях. Гидродинамика бассейнов на этих этапах определяется в основном процессами уплотнения толщ осадочных пород. По сте-

* В приведенных формулах r — коэффициент, характеризующий отношение анионов сильных кислот к анионам слабых.

пени минерализации воды в породах на этой стадии существования артезианских бассейнов мало или совсем не отличается от вод бассейнов седиментации. Инфильтрационные этапы формирования бассейнов связаны с восходящими тектоническими движениями и возникновением зоны гипергенеза.

Гидрогеологические массивы приурочены к щитам древних платформ и складчатым областям разного возраста. Они сложены изверженными метаморфическими и осадочными, сильноуплотненными, тектонически раздробленными и дислоцированными породами, водопроницаемость которых обусловлена наличием трещин разного генезиса. Для них характерны трещинно-жильные и пластово-трещинные скопления подземных вод.

В гидрогеологических структурах разного типа создаются различные гидродинамические, гидрохимические и температурные условия, однако общей чертой всех регионов является зональность распространения подземных вод, разных по гидродинамическим, гидрохимическим и температурным условиям [14, 15]. Различают широтную (географическую) и вертикальную (геологическую) зональность подземных вод.

Широтная зональность в пределах СССР проявляется в последовательной смене вод зоны свободного водообмена разной минерализации и ионного состава от северных, более увлажненных широт к южным, более засушливым широтам. Основные факторы, обуславливающие географическую зональность подземных вод, — климат и степень проточности пород в гидродинамической зоне свободного водообмена.

Вертикальная зональность выражается в закономерном изменении по мере углубления в недра земли таких свойств воды, как подвижность, степень минерализации, химический состав, температура. Это находит свое выражение в существовании в земной коре разной зональности: гидродинамической, гидрохимической, гидротермической.

В вертикальном разрезе артезианских бассейнов выделяются три гидродинамические зоны: свободного, затрудненного и весьма затрудненного водообмена. Гидродинамические зоны объединяются в два гидродинамических этажа: верхний и нижний. Верхний гидродинамический этаж включает в себя зоны свободного и затрудненного водообмена, где происходит сравнительно интенсивное движение воды, нижний — зону весьма затрудненного водообмена, где движение флюидов очень медленное [15].

Гидрохимическая зональность большинства гидрогеологических структур характеризуется последовательным увеличением минерализации воды с глубиной. В соответствии с классификацией подземных вод по их минерализации (см. табл. 3) выделяются три гидрохимические зоны: пресных, соленых, рассольных вод (рассолов). Каждая зона разделяется на подзоны. В основе расчленения гидрохимических зон на подзоны лежат подгруппы подземных вод, выделенные по степени минерализации. В вертикальном разрезе земной коры гидрохимические зоны и подзоны располагаются

в последовательности, указанной в табл. 3. В некоторых случаях происходит уменьшение минерализации вод с глубиной или чередование в вертикальном разрезе вод разной минерализации. Тогда говорят об инверсионных гидрохимических разрезах.

В артезианских бассейнах наиболее распространены типы гидрохимических разрезов, характеризующиеся:

1) постепенным увеличением минерализации воды вплоть до фундамента бассейна. Этот тип наиболее распространен в бассейнах, лишенных галогенных отложений, расположенных в пределах Западно-Сибирской артезианской области, а также в отдельных бассейнах других областей (Камчатка, Сахалин и др.);

2) чередованием зон подземных вод разной минерализации. Наиболее часто этот тип разрезов встречается в южной части Азово-Кубанского и Терско-Каспийского бассейнов Каспийско-Черноморской артезианской области;

3) повышением минерализации воды в верхней части, а затем некоторым уменьшением к фундаменту. Этот тип разреза установлен в артезианских бассейнах, в геологическом строении которых участвуют мощные толщи соленосных отложений (Волго-Уральской, Ангаро-Ленской, Западно-Туркменской и др.) [15].

В вертикальном разрезе земной коры выделяются гидротермические зоны и пояса. Под гидротермической зоной понимается часть разреза, в пределах которой распространены подземные воды определенной температуры, ограниченной условно принятыми значениями в соответствии с классификацией подземных вод по температурному признаку: сверххолодные (ниже 0—1 °С), холодные (0—20 °С), теплые (до 35 °С) и т. д. (см. выше). Максимальная температура у поверхности фундамента служит основным признаком для выделения гидротермических поясов. Каждый пояс состоит из одной или нескольких гидротермических зон. Так, пояс, в котором до фундамента распространены холодные воды, называется поясом холодных вод. Если под холодными водами до фундамента распространены теплые воды, то пояс называется поясом теплых вод и т. д. [15].

Существует в земной коре и газовая зональность. На примере подземных вод в основании платформенного осадочного чехла европейской части СССР с учетом окислительно-восстановительной обстановки, общего химического и газового состава, минерализации и температуры А. В. Щербаковым [61] выделены следующие зоны:

Окислительная геохимическая обстановка

Кислородно-азотных холодных пресных вод

Углекислых, холодных, реже термальных, пресных и слабоминерализованных вод

Переходная геохимическая обстановка

Преимущественно азотных, азотно-углеводородных, холодных и термальных минерализованных вод

Углекисло-азотных, холодных, реже термальных пресных и минерализованных вод

Преимущественно сероводородных, азотно-углеводородных термальных минерализованных вод

Азотно-углеводородных и углеводородно-углекислых термальных и перегретых минерализованных вод

Углеводородно-углекислых и водородно-сероводородных перегретых минерализованных вод

Для характеристики подземных вод как среды для развития и жизнедеятельности микроорганизмов важное значение имеет содержание органического вещества. Согласно данным В. М. Швеца [59], в различных природных объектах (водах, почвах, породах и илах), тесно связанных между собой, содержится широкая гамма разнообразных органических соединений. Это различные органические кислоты (жирные, гуминовые, нафтенновые и др.), аминокислоты, битумы (масла, воски, смолы, жиры), фенолы, гуминовые вещества и т. д.

Общее содержание органического вещества в почвах, породах и природных водах различно. Наиболее обогащены органическим веществом почвы (максимально до 25 и даже до 73 %). В морских илах его содержание достигает 10 %, в подземных водах и горных породах — примерно одного порядка (до $n \cdot 10^{-1}$ %). Максимальные содержания органического вещества характерны для вод нефтегазовых месторождений (граммы на литр или $n \cdot 10^{-1}$ %), в водах вне месторождений они составляют лишь $n \cdot 10^{-3}$ %. Менее всего органического вещества содержится в атмосферных осадках и океанических водах ($n \cdot 10^{-4}$ %). Промежуточное положение между объектами с максимальным и минимальным его содержанием занимают поровые и иловые растворы ($n \cdot 10^{-4}$ — $n \cdot 10^{-2}$ %).

Главными источниками органического вещества в подземных водах на фильтрационном этапе их истории являются почвы и горные породы, тогда как седиментогенные воды используют лишь «морское» органическое вещество илов и осадочных пород [59]. Из пород в подземные воды поступают не только органические, но и минеральные вещества, также необходимые для жизни микроорганизмов. Большинство известных химических элементов обнаружено, как уже отмечалось, в настоящее время в подземных водах.

Подземные воды подразделяются на три группы: инфильтрагенные, седиментогенные и метаморфогенные.

Инфильтрагенные воды проникают в горные породы уже после образования последних. Обогащение инфильтрагенных вод химическими компонентами осуществляется путем взаимодействия их с породами. Химический состав подземных вод зависит от минерального состава пород и растворимости его компонентов, а также от динамики вод, от содержания CO_2 и др. Рудные залежи также оказывают влияние на химию подземных вод, обогащая их микрокомпонентами, входящими в состав рудных минералов.

Седиментогенные воды находятся в осадочных породах с момента образования последних. В стадии диагенеза они представ-

ляют собой «иловые воды» (растворы) химический состав их унаследован в основном от вод бассейнов седиментации и изменен в разной степени в результате обменных реакций [Карцев А. А., 1972 г.].

Существенную роль в изменении химического (ионного и газового) состава подземных вод играют, как будет показано ниже, микроорганизмы. Особенно это относится к инфильтрогенным и седиментогенным водам. Микроорганизмы проникают с инфильтрогенными водами в процессе как субаэральной (наземной), так и субаквальной (подводной) инфильтрации. При наземной инфильтрации подземные воды обогащаются микрофлорой, свойственной почвам и породам, через которые проходят атмосферные осадки. При подводной инфильтрации в недра земли проникают микроорганизмы морей и океанов. Седиментогенные воды могут унаследовать микрофлору «иловых вод» (растворов).

Таким образом, система вода—порода характеризуется большим разнообразием физико-химических, геологических, гидрогеологических и геохимических условий, способных влиять на развитие и жизнедеятельность микроорганизмов в недрах Земли. В гидрогеологических структурах, различающихся степенью минерализации и температурой подземных вод, гидрогеологическими условиями, литологией и минеральным составом пород и др., создаются условия для формирования разных экологических систем. В этих системах могут получить развитие различные микроорганизмы: пресноводные и галофилы, психрофильные и термофилы, аэробные и анаэробные, автотрофы и гетеротрофы. Все они по мере своих физиологических и биохимических возможностей могут принимать участие в различных геохимических процессах, связанных с преобразованием химического состава вод и вмещающих их пород.

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЫ, МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ, ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ И ЧИСЛЕННОСТИ БАКТЕРИЙ

Отбор проб. Пробы воды на микробиологический анализ отбирают в основном из источников, родников и скважин. Скважины для взятия микробиологических проб воды подготавливают так же, как и для взятия проб на химический анализ, а именно:

1) при самоизливе скважин обеспечивают отбор проб после максимального промыва скважины и установления постоянства состава воды, что может быть достигнуто в результате длительного самоизлива при обязательной смене двух-трех объемов воды;

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

Основное условие при отборе проб на микробиологический анализ — соблюдение стерильности. Пробы воды отбирают только в стерильные бутылки, которые открывают и закрывают под водой, держа пробку за верхний конец. В бутылку не должны попадать вода, стекающая с рук, куски почвы, пыль и окружающий воздух. Для отбора бактериологических проб из скважин, шурфов и других горных выработок рекомендуется пользоваться бактериологическими батометрами системы Г. А. Могилевского, З. И. Кузнецовой [6].

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

После отбора пробы наклеивают на бутылку или привязывают к горлышку бутылки этикетку с указанием следующих данных:

- а) год, месяц, число отбора пробы;
- б) местонахождение объекта опробования;
- в) проба № , источник, скважина;
- г) условия отбора пробы (при откачке или самоизливе);
- д) интервал опробования;
- е) температура воды,
- ж) рН воды;
- з) кем отобрана проба.

Хранение и транспортировка проб. Бактериологические пробы в течение одной-двух недель должны быть отправлены на место их анализа. Перед отправкой пробы необходимо поместить в прохладное место. Их нельзя держать на солнце, так как его лучи убивают бактерии.

Методика выделения микроорганизмов. Для выделения отдельных видов и физиологических групп бактерий из вод, пород и руд применяют известные питательные среды (табл. 5). Приготовленные соответствующим образом среды стерилизуют в автоклаве под давлением 0,5 ат в течение 30 мин, питательную среду для выделения сульфатвосстанавливающих бактерий — под давлением 1 ат в течение 20 мин.

Для выделения *T. thiooxidans* рекомендуется использовать две среды (табл. 5), по составу различающиеся тем, что в одной из них источником энергии служит сера элементарная, а в другой — гипосульфит $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Две среды необходимы потому, что микроорганизм, обитающий в слабокислых (рН=6,1÷÷6,9), нейтральных или близких к нейтральным (рН=7,0÷7,2) и слабощелочных (рН=7,3÷7,7) водах, выделяется лучше на среде с гипосульфитом, чем на среде с серой. Возможно, что на указанных двух средах выделяются разные штаммы этого кислотолюбивого организма, которые можно рассматривать как

Питательные среды для выделения тионовых, сульфатовосстанавливающих и водородпродуцирующих бактерий из природных вод

Состав среды	Кол-во соли в 1 л дистиллированной воды, г				Кол-во соли в 1 л водопроводной воды, г		
	Водород-продуцирующие бактерии	<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	<i>T. thioparus</i>	<i>T. ferrooxidans</i>	<i>T. trautweinii</i>	<i>T. denitrificans</i>	Сульфатовосстанавливающие бактерии (среда Таусона)
Агар-агар	7,5	—	—	—	—	—	—
Глюкоза	10,0	—	—	—	—	—	—
FeSO ₄ ·7H ₂ O	—	Сл.	—	—	—	Сл.	—
N ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	—	5,0 г или	5,0	—	2,0	—	—
S (сера черенковая)	—	по 0,5—0,25 г на 100 мл среды	—	—	—	По 0,5—0,25 г на 100—50 мл среды	—
KH ₂ PO ₄	—	3,0	—	0,1	—	—	—
K ₂ HPO ₄	0,4	—	—	—	—	0,2	0,5
N ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	—	—	0,2	—	2,0	—	—
KCl	—	—	—	0,05	—	—	—
KNO ₃	—	—	—	—	1,0	0,5	—
Ca(NO ₃) ₂	—	—	—	Сл.	—	—	—
(NH ₄) ₂ SO ₄ ·7H ₂ O	—	0,2	—	—	—	—	4,0
NH ₄ Cl	1,0	—	0,1	—	—	—	—
Na ₂ CO ₃	—	—	—	—	—	0,2	—
NaHCO ₃	—	—	1,0	—	1,0	—	—
CaCO ₃	—	—	—	—	—	20	—
CaCl ₂	—	0,25	—	—	—	—	—
CaSO ₄	—	—	—	—	—	—	2,5
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,2	0,5	—	0,5	—	—	1,0
MgCl ₂ ·6H ₂ O	—	—	0,1	—	0,1	—	—
Соль Мора	—	—	—	20 мл 20%-ного раствора	—	—	0,5
Лактат Са	—	—	—	—	—	—	3,5
pH после внесения посевного материала	—	5,0	8,5	2,5—3,5	8,2—8,5	7,2—7,4	7,0—7,4

«экологические варианты *T. thiooxidans*» [Заварзин Г. А., Жилина Т. Н., 1964 г.; 19].

Элементарную серу, являющуюся составной частью сред для выявления *T. denitrificans*, а также *T. thiooxidans* (если исследования ведутся на среде с серой), стерилизуют отдельно методом дробной стерилизации в автоклаве или путем многократного кипячения ее в дистиллированной воде. Перед посевом на каждые 50 мл среды вносят 1—2 г серы.

В среду для *T. ferrooxidans* вносят сернокислое железо в виде соли Мора. Раствор готовят следующим образом: 20 г соли Мора + 100 мл дистиллированной воды + 3—4 капли H_2SO_4 (концентрированной) стерилизуются при 0,5 ат в течение 20 мин. Из стерильного раствора берут 20 мл на 1 л среды [19].

Микроорганизмы *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans*, *T. thioparus* и *T. trautweinii* культивируют в аэробных условиях. Для этого колбочки заполняют соответствующей жидкой средой и посевным материалом до половины емкости и закрывают ватными пробками. Микроорганизмы *T. denitrificans* и сульфатовосстанавливающие бактерии (*D. desulfuricans*) культивируют в анаэробных условиях (заполнение средой и посевным материалом до горлышка, замена ватных пробок резиновыми). Оптимальное соотношение среды и посевного материала для вод 1:1.

Большие количества посевного материала берут для того, чтобы выявить и определить активность бактерий, обитающих не только в благоприятных для их жизнедеятельности условиях, но и в неблагоприятных, где они малоактивны, а также чтобы приблизить условия искусственной среды к естественным.

Для выявления тионовых и сульфатовосстанавливающих бактерий в каждой среде (табл. 5) устанавливаем определенное значение pH, соответствующее физиологическим потребностям микроорганизмов. Это необходимо потому, что исследованиям подвергаются воды с разными значениями pH, а внесенные в среду горные породы могут изменять pH среды в разной степени.

Весьма существенно значение pH, которое должно быть установлено в среде с гипосульфитом при выявлении *T. thiooxidans* после посева. Не рекомендуется создавать слишком низкие первоначальные значения pH в среде с гипосульфитом, при которых последний будет разлагаться не бактериальным, а химическим путем. Специально проведенные нами опыты показали, что при $pH = 3,15 \div 4,10$ (оптимальном для развития *T. thiooxidans*) химическим путем гипосульфит практически не разлагается, но при более низких значениях ($pH = 3,0$) наблюдается его химическое разложение, сопровождающееся выпадением серы [25]. Тем не менее для предотвращения от химического окисления гипосульфита в среде с указанным источником энергии первоначальное pH должно быть около 5,0. Подтверждением этому служат данные Г. И. Каравайко и др. [19], а также наблюдаемый и выявленный нами определенный диапазон pH для развития *T. thiooxidans* в жидкой минеральной среде (pH от 0,6 до 5,5).

Величина pH создается с помощью однонормальных стерильных растворов фосфорной или серной кислот, а также 10 %-ных растворов щелочей (NaOH, KOH), вносимых по капле в среду после посева.

Выделение и культивацию водородпродуцирующих бактерий производят в специальных узких и высоких пробирках вместимостью 5—10 мл, куда сначала вносят 2—5 мл исследуемого посевного материала, а затем разливают предварительно разогретую жидкую агаризованную среду по 5—10 мл так, чтобы воздушный слой в каждой пробирке составлял около $\frac{1}{3}$ ее высоты. Затем ватные пробки заменяют резиновыми (стерильными), пробирку интенсивно встряхивают до того, как среда успеет застыть. Таким образом, водородпродуцирующие бактерии культивируются в анаэробных условиях в высоком слое плотной среды.

Определение активности бактерий. Нами разработан и предлагается для широкого внедрения в практику метод учета активности микроорганизмов, обитающих в системе вода—порода. Метод основан на способности микроорганизмов производить определенную биохимическую работу, интенсивность которой зависит от активности бактерий. О степени активности выявляемых из подземных вод бактерий судят по количеству веществ, преобразованных бактериями на соответствующих средах за определенный срок инкубации. Для *T. ferrooxidans* — это количество Fe^{3+} в миллиграммах на литр, образованного из Fe^{2+} , которое устанавливают колориметрическим роданидным методом [Резников А. А.,

Муликовская Е. П., Соколов И. Н., 1970 г.]. Показателем наличия и активности *T. thiooxidans* (если культивация ведется на среде с гипосульфитом), *T. thioparus* и *T. trautweinii* служит количество окисленного гипосульфита ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), выраженное в процентах и установленное по разности между количеством гипосульфита, введенного в среду и оставшегося в ней после 20-суточной инкубации. Количество гипосульфита определяют йодометрическим методом. Если культивация *T. thiooxidans* ведется на среде с серой (0,25 г серы на 50 мл среды), показателем наличия микроорганизма *T. thiooxidans* служит подкисление среды в модификации Г. И. Каравайко [19].

Развитие и активность *T. denitrificans* оценивают по количеству образованных в среде нитритов в миллиграммах на литр или по выделению газообразного азота. Последнее устанавливается по визуальному наблюдению пузырьков газа, выделяющегося из раствора. Для определения нитритов используют реактив Грисса. Процесс превращения нитратов в нитриты под влиянием *T. denitrificans* с последующим образованием N_2 иногда протекает очень быстро. Поэтому нитриты необходимо определять в среде не только через 20, но и через 2 и 5 сут после посева, иначе отсутствие NO_2 может быть принято за отсутствие *T. denitrificans*.

О наличии и активности сульфатвосстанавливающих бактерий судят по образованию сероводорода, дающего в среде с солью Мора черный осадок, водородпродуцирующих бактерий — по образованию пузырьков газа в агаризованной среде во времени. Оценка активности бактерий сравнительная и носит условный характер (табл. 6).

Таблица 6

Определение и оценка активности бактерий в подземных водах

Бактерии	Развитие бактерий во времени	Активность
<i>T. ferrooxidans</i>	Образовано Fe^{3+} за 20 сут, мг/л: сотни десятки единицы меньше единицы	Высокая Средняя Низкая Отсутствует
<i>T. thiooxidans</i> , <i>T. thioparus</i> , <i>T. trautweinii</i>	Окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ за 20 сут, %: более 50 до 50 до 25 0	Высокая Средняя Низкая Отсутствует
<i>T. denitrificans</i>	Появление газа N_2 Образование NO_2^- мг/л: более 50 до 30 до 10 0	Высокая Средняя Низкая Отсутствует
Сульфатвосстанавливающие	Появление H_2S (почернение среды): через 7 сут 14 21—30	Высокая (++++) Средняя (++) Низкая (+)

Бактерии	Развитие бактерий во времени	Активность
Водородпродуцирующие	Нет H ₂ S (среда не почернела)	Отсутствует (0)
	Появление пузырьков газа (H ₂ +CO ₂): через 1—3 сут 3—5 7 нет газа	Высокая (+++) Средняя (++) Низкая (+) Отсутствует (0)

При микробиологическом исследовании подземных вод, пород и руд можно пользоваться методом количественного учета микроорганизмов (подсчет микроорганизмов методом серийных разведений). Чаще всего пользуются методом десятикратных разведений.

Для посева берут 1 мл исследуемой воды, которую вносят в пробирку, содержащую 9 мл стерильной воды. После тщательного перемешивания из последней пробирки снова берут 1 мл разведенной исследуемой воды и вносят в следующую пробирку, содержащую 9 мл стерильной воды и т. д. Таким образом, готовят ряд последовательных разведений: 10⁰, 10¹, 10², 10³, 10⁴, 10⁵, 10⁶. Затем из каждого разведения производят посев в питательную среду. Для каждого разведения используют новую, стерильную, пипетку. По наличию или отсутствию роста после инкубации судят о числе микроорганизмов. Так, например, если из ряда пробирок с десятикратным разведением рост микроорганизмов отмечен в разведении 10⁴ и отсутствует в разведении 10⁵, то считается, что в исследуемой воде содержится 10 000 клеток.

Методом десятикратных разведений мы пользовались при выявлении аммонифицирующих, денитрифицирующих (гетеротрофов) и бактерий, растущих на белковых средах — мясо-пептонном агаре (МПА). Число аммонифицирующих бактерий определяли путем посева различных разведений воды в пробирки с мясо-пептонным бульоном. О наличии процесса аммонификации судили по посинению красной лакмусовой (стерильной) бумажки, которую подвешивали внутри пробирки над средой.

Известно, что процесс аммонификации происходит одновременно с процессом выделения сероводорода из белковых веществ. Чтобы определить выделение сероводорода вместе с красной лакмусовой бумажкой, над средой подвешивали полоску фильтровальной бумаги, пропитанной уксуснокислым свинцом.

Денитрифицирующие гетеротрофы выявлялись на среде Гильтая, (для ее изготовления готовят два раствора), имеющей следующий состав:

I раствор

Дистиллированная вода, мл	500
Азотнокалиевая соль, г	2
Глюкоза, г	10

II раствор

Дистиллированная вода, мл	500
Лимоннокислый натрий, г	2,5
Фосфорнооднокалиевая соль, г	2

Сернокислый магний, г	2
Хлористый кальций, г	0,2
Полуторахлористое железо	Следы

Растворы сливают вместе, устанавливают реакцию среды до $\text{pH}=7,0$, прибавляют 5—6 мл индикатора (бромтимоловый синий) для того, чтобы следить за ходом процесса по изменению реакции среды. Цвет среды становится зеленым. Среду разливают в пробирки высоким слоем и стерилизуют в автоклаве при 0,5 ат в течение 20 мин. Питательную среду засевают исследуемой водой в различных разведениях. Засеянные пробирки ставят в термостат при 25—30°C.

За началом процесса денитрификации следят через сутки. Наличие процесса отмечается по выделению газов, образующих пену различной высоты на поверхности среды, по исчезновению нитратов, появлению нитритов, их исчезновению, по появлению аммиака.

Для определения нитратов (NO_3^-) используют колориметрический метод с фенолдисульфокислотой или дифениламиноый. Наиболее прост и распространен колориметрический метод с использованием реактива Грисса. Аммоний-ион (NH_4^+) определяют колориметрическим методом при помощи реактива Несслера [Резников А. А., Муликовская Е. П., Соколов И. Ю., 1970 г.].

Для определения числа бактерий, растущих на белковых средах, использовался метод разливок. Этот метод состоит в выращивании бактерий из определенного объема воды на МПА. Для производства посевов берут для чистых вод от 0,5 до 1,0, для явно загрязненных от 0,01 до 0,0001 мл. При очень малом содержании микроорганизмов в воде подсчет ведут на мембранных фильтрах. Для этого 100 мл воды фильтруют через мембранный фильтр, последний кладут в чашку Петри на поверхность питательного агара и проращивают. Выросшие на поверхности фильтра колонии окрашивают эритразином и просчитывают. Чашки Петри с посевами выдерживают в термостате при 22—23°C 48 ч, после чего производят счет колоний.

Методы выделения и количественного учета бактерий в воде и других природных объектах (почвах, породах) более подробно изложены в специальных руководствах [Симакова Т. Д., 1931 г.; Омелянский В. Л., 1940 г.; Разумов А. С., 1947 г.; Родина А. Г., 1950 г. и др.]. Исследования подземных вод некоторых сульфидных месторождений Центрального Казахстана, в частности, показали, что высокая активность *T. thioparus* (окислено 100 % гипосульфита за 20 сут инкубации) соответствует 10 тыс. клеток и более этого организма в 1 мл воды, а малая активность (окислено до 25 % гипосульфита за 20 сут инкубации)—100 клеток и менее в 1 мл воды. Примерно такие же соотношения получены и при выявлении в указанных водах *T. thiooxidans* на среде с гипосульфитом.

В кислых водах ($\text{pH}=2,0\div 3,0$) Дегтярского месторождения, где *T. ferrooxidans*, согласно нашим данным, весьма высокоактивен (окислено 300 мг/л Fe^{2+} до Fe^{3+} в течение 3—4 сут). Число бактерий в 1 л воды, по данным Н. Н. Ляликовой, составило 10—1 тыс. клеток [42].

К сожалению, приведенные отношения, характеризующие прямо пропорциональную зависимость между активностью и числом выявленных видов тионовых бактерий, не всегда подтверждают ее при исследовании подземных вод. Довольно часто бактерии при малом количестве (100 клеток в 1 мл воды) окисляются высокоактивными. Бывают случаи, когда методом десятикратных разведений бактерии не выявляются, в то время как при определении активности устанавливается их наличие. Так, например, в нейтральных и слабощелочных водах Пышминского месторождения (Средний Урал) при малой активности *T. ferrooxidans* (5 мг/л Fe^{3+} из Fe^{2+}) этот микроорганизм Н. Н. Ляликовой не был выявлен [42].

Выбор метода зависит от целей и задач, предъявляемых к микробиологическим исследованиям. При региональных исследованиях, а также при использовании бактерий в поисковых целях важно знать активность микроорганизмов. Когда анализы выполняются в полевых условиях, удобнее применять предлагаемый метод оценки активности бактерий. Он может использоваться не только микробиологами, но и гидрохимиками, знакомыми с методами химического анализа подземных вод.

Бактерии, окисляющие углеводороды, выявлялись на минеральной среде Рана. Состав ее следующий:

Дистиллированная вода, л	1
K_2HPO_4 , г	5
$(NH_4)_3SO_4$, г	2,5
$(NH_4)_3PO_4$, г	2,5
$MgSO_4$, г	1
$CaCl_2$, г	1
$FeCl_3$ и $NaCl$	Следы

Углеводороды (нефть, бензин, расплавленный парафин, индивидуальные жидкие нефтяные углеводороды) вносили в пробирки на поверхность указанной среды. Интенсивность развития бактерий, окисляющих углеводороды, определяли по мощности образующейся бактериальной пленки, степени помутнения среды, а также по скорости появления этих признаков. Соответственно интенсивность развития условно обозначали одним, двумя или тремя баллами, отсутствие развития — нулем.

Метаноокисляющие бактерии выявлялись по методу Г. А. Могилевского [1953 г.]. Методика количественного учета тионовых бактерий приведена в работе [19].

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАЗВИТИЕ И ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТЬ МИКРООРГАНИЗМОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температура относится к числу важных физических факторов, определяющих не только интенсивность развития того или иного микроорганизма, но и самую возможность его развития. Известно, что высокие и низкие температуры далеко не одинаково влияют на микроорганизмы. Нижнего предела температур, при котором бактерии сохраняются живыми, практически не существует. Некоторые из них выдерживают температуру жидкого воздуха (-190°C) и даже жидкого водорода (-252°C). Это происходит потому, что наибольшую опасность представляет не сама низкая температура, а кристаллы льда внутри клетки, которые могут повредить ее механически. Высокие температуры, напротив, легко повреждают и убивают клетки. При высоких температурах белки клетки коагулируют, ферменты инактивируются [Работнова И. Л., 1966 г.]. Систематизированных данных о влиянии различных температур на распространение и жизнедеятельность микроорганизмов в подземных водах в литературе практически нет. В некоторых работах [Марихин Е. К., Стратуа Д. С., 1977 г.] лишь частично освещается этот вопрос, при этом он касается в основном термальных вод.

Влияние различных температур на микрофлору подземных вод было изучено нами при микробиологическом исследовании подземных вод, температура которых изменялась от -2 до $97-98^{\circ}\text{C}$. Это были над- и подмерзлотные воды районов многолетней мерзлоты (Предтаймырье, Якутия, Западно-Саянская область), глубокие воды Восточной и Западной Сибири, Средней Азии, гидротермы областей современной вулканической деятельности (Курильские острова) и др. Полученные данные систематизированы в соответствии с вышеприведенной классификацией подземных вод по их температурным показателям (табл. 7). Из табл. 7 видно, что сверххолодные воды, свойственные районам многолетней мерзлоты (Предтаймырье, Якутия), содержат разнообразную и активную микрофлору. В них обнаружены аэробные аммонифицирующие и тионовые бактерии, факультативные денитрифицирующие гетеротрофы, а также бактерии, растущие на белковых средах. Число последних составляет тысячи клеток в 1 мл воды. В очень холодных водах этих и других районов кроме вышеназванных бактерий обнаружены денитрифицирующие миксотрофы. Встречаются также сульфатовосстанавливающие и водородпродуцирующие бактерии. Число бактерий, растущих на белковых средах, до десятков тысяч клеток в 1 мл воды. Холодные воды содержат такую же по составу, активности и численности микрофлору, что и очень

Активность и численность (максимальные) микроорганизмов в подземных водах с разными температурами

Температура исследованных вод, °С	Аэробные			Факультативные денитрифицирующие		Анаэробные		Бактерии, растущие на белковых средах (число клеток в 1 мл воды)	Район исследования
	Аммонифицирующие (число клеток в 1 мл)	Тионовые (окислено $N_{2-3}S_2O_3$, %)	Окисляющие углеводороды (число клеток в 1 мл)	Гетеротрофы (число клеток в 1 мл)	Миксотрофы (образовано NO_2^- , мг/л)	Сульфатвосстанавливающие	Водородпродуцирующие (число клеток в 1 мл воды)		
Сверххолодные воды ($t < 0^\circ C$)									
-1 ÷ -2	1 000	100	—	—	37,5	0	—	Тысячи	Предтаймырье, верхнее течение р. Курейки Якутский бассейн
0	10 000	50	—	10 000	60	0	1000	Десятки тысяч	
Очень холодные воды ($t = 0 \div 4^\circ C$)									
0	—	100	—	—	37,5	+++	—	—	Якутия (свинцово-цинковое месторождение) То же Западный Саян Якутский бассейн
1-4	—	100	—	—	До N_2	+++	—	—	
1-4	—	100	—	—	60	0	—	—	
1-4	10 000	100	—	10 000	60	+++	1000	Десятки тысяч	
Холодные воды ($t = 4 \div 20^\circ C$)									
4-10	—	100	—	—	До N_2	+++	—	—	Якутия (месторождение Сардана) Западный Саян Восточно-Сибирская артезианская область Якутский бассейн Западный Саян и Западный Танну-Ола
4-10	—	100	—	—	10	++	—	—	
4-10	1000	50	—	100	75	+++	1000	Десятки тысяч	
10-15	—	100	—	—	До N_2	0	—	—	
10-15	—	100	—	—	60	+++	—	—	

10—15	1000	100	—	1000	75	+	10	—	Восточно-Сибирская артезианская область
15—20	—	100	—	—	7,5	+++	—	—	Чу-Сарысуейский бассейн
16—20	—	100	—	—	—	+++	—	—	Амударьинский бассейн

Теплые воды ($t=20 \div 30$ °C)

22—28	—	100	—	—	3,5	+++	—	—	Чу-Сарысуейский бассейн
27—35	+++	100	10	10 000	75	+++	—	Тысячи	Западно-Сибирский бас- сейн
22—24	—	100	—	—	До N ₂	+++	—	—	Амударьинский бассейн
23—33	—	100	—	—	До N ₂	+	—	—	Таджи-Казганский бас- сейн
23—35	—	100	—	—	100	+	—	Сотни	Западно-Туркменский бассейн
21—25	—	0	—	—	100	+	—	Десятки тысяч	Бухаро-Каршинский бас- сейн

Горячие воды (термальные, $t=35 \div 50$ °C)

35—45	—	100	1000	10 000	100	+++	—	Сотни тысяч	Западно-Сибирский бас- сейн
45—50	—	100	1000	10 000	—	++	—	Миллионы	То же
39—44	—	100	—	—	—	—	—	Десятки	Западно-Туркменский бассейн
40	—	100	—	—	—	0	—	—	Курильские острова

Очень горячие воды (термальные, $t=50 \div 70$ °C)

50—60	—	—	1000	10 000	—	++	—	—	Восточно-Сибирская артезианская область
54	—	50	—	—	—	++	—	—	Забайкалье
50—60	—	50	1000	100 000	—	+++	100	Миллионы	Западно-Сибирский бас- сейн
60—70	—	—	100	100 000	—	+++	—	Десятки тысяч	То же
51	—	98	—	—	—	+++	—	То же	Бухаро-Каршинский бассейн
62—65	—	50	—	—	—	+++	—	—	То же
55,5	—	55	—	—	—	++	1000	—	Курильские острова

Температура исследован- ных вод, °С	Аэробные			Факультативные денитрифицирующие		Анаэробные		Бактерии, растущие на белковых сре- дах (число клеток в 1 мл воды)	Район исследования
	Аммонифици- рующие (чис- ло клеток в 1 мл)	Тяговые (окислено $N_2S_2O_3$, %)	Окисляющие углеводороды (число клеток в 1 мл)	Гетеротрофы (число клеток в 1 мл)	Миксотрофы (образовано NO_2^- , мг/л)	Сульфатвос- станавливаю- щие	Водородпро- дуцирующие (число кле- ток в 1 мл воды)		
Весьма горячие воды (термальные, $t=70 \div 100$ °С)									
73	—	50	—	—	—	+++	—	—	Забайкалье
73	—	100	—	—	0,8	+++	—	—	„
72	—	0	—	—	2,5	—	—	Десятки	Бухаро-Каршинский бас- сейн
70—75	—	60	1000	100 000	—	+++	1000	Сотни тысяч	Западно-Сибирский бас- сейн
75—78	—	—	1000	10 000	—	++	100	То же	То же
83	—	—	1000	1 000	—	+++	0	Десятки тысяч	„
84	—	—	—	1 000	—	+	0	—	„
72	—	100	—	—	1,2	+	—	—	Курильские острова
78	—	0	—	—	62,5	+++	—	—	То же
86	—	61	—	—	288	0	0	—	„
97—98	—	57	—	—	0	0	0	—	„

холодные. В теплых водах состав бактерий не изменяется, но активность некоторых из них (денитрифицирующие миксотрофы) возрастает. Число бактерий, растущих на белковых средах, исчисляется десятками тысяч в 1 мл воды.

Горячие воды артезианских бассейнов характеризуются присутствием высокоактивных тионовых бактерий и многочисленными бактериями, растущими на белковых средах. Число последних в горячих водах Западно-Сибирского артезианского бассейна достигает 1 млн. клеток в 1 мл воды.

Активным развитием тионовых бактерий характеризуются горячие воды областей современной вулканической деятельности.

В очень горячих водах артезианских бассейнов активность аэробных тионовых бактерий снижается, но усиливается активность анаэробных сульфатовосстанавливающих. Число бактерий, растущих на белковых средах, остается высоким (до 1 млн. клеток в 1 мл воды). Весьма горячие воды гидротерм областей современной вулканической деятельности населены в основном аэробными тионовыми бактериями. Встречаются здесь и факультативные денитрифицирующие миксотрофы. В таких же по температурным показателям водах артезианских бассейнов наряду с активными аэробными и факультативными бактериями активно развиваются и анаэробные. Число бактерий, растущих на белковых средах, составляет сотни тысяч клеток в 1 мл воды.

Таким образом, микроорганизмы живут и находятся в активном состоянии в различных по температурным показателям подземных водах: холодных (сверххолодных, очень холодных, холодных) и термальных (теплых, горячих, весьма горячих).

Наиболее низкая температура, при которой бактерии обнаружены в активном состоянии, —2 (подземные воды деятельного слоя многолетней мерзлоты Предтаймырья), наиболее высокая 97 °С (гидротермы областей современной вулканической деятельности — Курильские острова).

Температура исследованных вод предопределяет развитие в них психрофильных (оптимум 4—10 °С), мезофильных (оптимум 20—35 °С) и термофильных (оптимум 30—60 °С) бактерий [Работнова И. Л., 1966 г.]. Термофильные бактерии в свою очередь делятся на стенотермные (оптимум развития 50—65, максимум 75—80 °С, при 28—30 °С не развиваются) и эвритермные (оптимум развития 50—65 °С, при 18—20 °С и выше развиваются) формы (по классификации А. А. Имшенецкого [1944 г.]).

Существование названных форм в исследованных водах установлено в результате экспериментального изучения отношения выделенных бактерий к низким (4 °С), средним (30 °С) и высоким (65, 75, 80 °С) температурам.

Психрофильные бактерии, хорошо растущие при низкой температуре (4—10 °С) и не растущие или слабо развивающиеся при средней (30 °С), обитают в сверххолодных и холодных водах Предтаймырья, Якутии. В основном это аэробные тионовые и факультативные денитрифицирующие бактерии (табл. 8). Особенно

Активность психрофильных бактерий при низкой (4 °С) и средней (30 °С) температурах вод источника

Район исследования	Температура воды, °С	Бактерии	Активность (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, %)	Число клеток в 1 мл воды
Предтаймырье	-2 ÷ -1	Тионовые	$\frac{23-100}{0}$	$\frac{-}{-}$
Якутия, левый берег р. Лены	0	Денитрифицирующие гетеротрофы	$\frac{-}{-}$	$\frac{100-1000}{0-100}$
Удоканское месторождение	1	Тионовые	$\frac{20-100}{0}$	$\frac{-}{-}$
То же	2	„	$\frac{47}{0}$	$\frac{-}{-}$
„	4	„	$\frac{100}{79}$	$\frac{-}{-}$

Примечание. В числителе указаны активность и число клеток при 4, в знаменателе соответственно — при 30 °С.

высокой активностью при низкой температуре отличались тионовые бактерии типа *T. thiooxidans*, выделенные из подземных вод деятельного слоя Предтаймырской зоны, температура которых была ниже 0 °С. Уже на третьи сутки после их культивирования при 4 °С они окислили весь внесенный в среду гипосульфит. При 30 °С гипосульфит не был окислен даже в течение 30-суточной инкубации. Это свидетельствует о том, что психрофильные бактерии занимают особое место в составе бактериальных ценозов холодных вод и играют важную роль в развитии в них биохимических процессов, которые под влиянием этих бактерий активизируются.

Мезофильные бактерии, хорошо растущие при 28—30 °С, самые распространенные в подземных водах микроорганизмы. Они обитают и находятся в активном состоянии в водах различной температуры. Мезофильные бактерии обнаружены не только в теплых и горячих водах (при оптимальных для них значениях температур), но и в очень горячих и весьма горячих, а также сверххолодных, очень холодных и холодных водах, т. е. далеко за пределами известного для них температурного оптимума. К числу мезофилов, обитающих в подземных водах, относятся разные физиологические группы бактерий: аммонифицирующие, тионовые, денитрифицирующие, сульфатовосстанавливающие и др.

Согласно представлениям большинства исследователей, мезофильные бактерии являются исходными формами, из которых в результате адаптации к повышенным температурам произошли термофильные бактерии. Эти бактерии, хорошо растущие при

65, 70, 80 °С, обнаружены в горячих, очень горячих и весьма горячих водах различных регионов. Они выявлены в азотных термах Забайкалья, Дальнего Востока, в гидротермах Курильских островов, в подземных водах артезианских бассейнов (табл. 9, 10). Для азотных терм и подземных вод артезианских бассейнов характерны анаэробные термофильные сульфатовосстанавливающие бактерии, представленные стенотермными и эвритермными формами. В гидротермах современной вулканической деятельности чаще обнаруживаются аэробные термофильные тионовые и факультативные денитрифицирующие миксотрофы.

Таблица 9

Активность термофильных бактерий, выделенных из термальных вод различных регионов

Источник	рН воды	Температура воды, °С	Температура исследования, °С	Тионовые			Денитрифицирующие, окисляющие серу (образовано NO ₃ , мг/л)	Сульфатовосстанавливающие
				Кислая среда		Щелочная среда		
				S	Окислено Na ₂ S ₂ O ₃ , %			
Забайкалье								
Гусихинский	8,5	44	70	0	0	0	—	+
			30	0	0	100	—	0
”	8,4	55	70	0	0	0	0	+++
			30	0	0	100	0	0
Аллинский	8,4	71	70	0	0	0	0	+++
			30	0	0	0	0	+++
Дальний Восток								
Анненский	9,3	52	70	0	0	0	45	+++
			30	0	0	100	30	0
Курильские острова								
Горячий ключ	7,5	55	65	0	0	0	0	++
			30	0	50	55	0	++
Вулкан Менделеева	4,1	58	65	++	100	0	2,5	0
			30	++	100	0	5,0	0
Южно-Третьяковский	6,8	72	65	+++	100	100	2,5	+
			30	0	100	0	1,25	+
Столбовский	7,2	77	65	+	0	0	62,5	+
			30	0	0	0	62,5	+++
Нижнеменделеевский	1,8	82	65	+++	0	0	0	++
			30	+++	57	0	0	0
Верхнеменделеевский	2,65	86	65	+++	100	0	2,5	+
			30	+++	100	100	1,2	+
Колодец на «Горячем пляже»	7,1	86	65	0	0	0	15	0
			30	0	0	0	0	0
Нескученский	7,25	97	65	0	0	100	0	+++
			30	0	0	100	0	0

Активность термофильных сульфатовосстанавливающих бактерий при высокой (80 °С) и средней (30 °С) температурах

Водопункт	Интервал опробования, м	Температура воды, °С	Активность бактерий
Западно-Сибирский артезианский бассейн			
Скв. Березово 2-Р	1230—1233	48	$\frac{++}{++}$
Скв. Березово 4-Р	1264—1268	51	$\frac{+++}{+++}$
Скв. Омская 1-Р	2830—3001,5	83	$\frac{+++}{++}$
Волго-Камский артезианский бассейн (Второе Баку)			
Скв. Калиновка 325	258—261	11,5	$\frac{++}{++}$
Скв. Байтуган 91	725—750	17	$\frac{++}{++}$

Примечание. В числителе указана активность бактерий при 80, в знаменателе — 30 °С.

Термофильные сульфатовосстанавливающие бактерии, наиболее высокоактивные при 80 °С, выделены из вод Западно-Сибирского артезианского бассейна, вскрытых скв. Омской с температурой 83 °С (мезозойские отложения на контакте с фундаментом, глубина 2800—3001,5 м) и из конденсата вода — нефть, вскрытого скв. Березово 4-Р, с температурой 51 °С (те же отложения, глубина 1264—1268 м; табл. 9 и 10).

Особенно высокой активностью отличались термофильные сульфатовосстанавливающие бактерии из конденсата, вскрытого скв. Березово 4-Р. При температуре 80 °С они образовывали сероводород уже на вторые сутки после посева; клетки бактерий при этом характеризовались необычайной подвижностью.

Кроме термофильных сульфатовосстанавливающих из вышеупомянутого конденсата выделены также термофильные тионовые бактерии типа *T. thioparus*, которые при 80 °С активно окисляли гипосульфит. Клетки их при данной температуре также были весьма подвижными (исследования И. И. Призреновой).

Активная биохимическая деятельность термофильных бактерий, обитающих в термальных подземных водах, связана с определенными физиологическими и биохимическими свойствами этих микроорганизмов. Прежде всего, они способны к ресинтезу основных компонентов протоплазмы и ферментов, которые повреждаются высокой температурой. По сравнению с мезофильными формами

протенны и ферменты термофильных бактерий более устойчивы к нагреванию, что обусловлено самой структурой белковой молекулы, более прочными, более многочисленными или более удачно расположенными водородными и другими связями. Кроме того, термофилы обладают защитными веществами, которые предохраняют протенны от денатурации и др. [Логина Л. Г. и др., 1966 г.]. Существенным и отличительным признаком термофилов являются также их ускоренный обмен и большая скорость деления клеток. Благодаря этому происходят более быстрое превращение субстратов, подвергающихся воздействию этих микроорганизмов, и накопление продуктов жизнедеятельности бактерий.

В связи с развитием молекулярной биологии появилась возможность детально изучить функциональную зависимость различных клеточных компонентов от высокой температуры [41]. Оказалось, что такие структурные клеточные элементы, как оболочка, мембраны, рибосомы, и входящие в состав клетки рибонуклеиновые кислоты, протеины, жиры, ферменты заметно отличаются качественно и количественно от подобных клеточных элементов мезофильных форм.

Американский исследователь Т. Д. Брок [Brock T. D., 1969 г.] высказал мнение о решающей роли клеточной мембраны в предохранении клетки от теплового повреждения. Оболочка клетки термофилов обладает заметной устойчивостью к действию высокой температуры. Это обусловлено ее химическим составом и более устойчивым к температуре механизмом, осуществляющим синтез клеточных стенок, чем у мезофилов. Мембраны термофильных бактерий имеют высокую механическую прочность, а также иной химический состав. Рибосомы и рибонуклеиновая кислота (РНК), выделенные из термофильных бактерий, обладают значительно большей термостабильностью, чем рибосомы, выделенные из мезофильных форм. Многие свойства облигатно-термофильных микроорганизмов закреплены наследственно, и эти формы не могут существовать при перенесении их в обычные температурные условия [83].

Обращает на себя внимание тот факт, что некоторые бактерии, выделенные из холодных вод, способны развиваться при высоких температурах. Так, эвритермные формы сульфатовосстанавливающих бактерий обнаружены нами в водах нефтяных месторождений Второго Баку, вскрытых скв. Калиновка 325 и Байтуган 91, температура которых в период исследования составляла соответственно 11,5 и 17°C (табл. 10).

Способность выделенных бактерий развиваться при температуре, значительно превышающей температуру их нахождения, может быть объяснена двумя причинами: либо термофильные бактерии привносятся в холодные воды из других водоносных горизонтов, температура которых выше температуры исследованных вод, либо они являются потомками ранее существовавших здесь термофильных бактерий, т. е. исследованные воды в геологическом прошлом были не холодными, а термальными. В обоих

случаях мы сталкиваемся с известными законами «биологической адаптации» и «накопления информации» [Тринчер К. С., 1965 г.], когда живая клетка (микроорганизмы), адаптируясь к условиям среды своего существования, накапливает соответствующую информацию, которая, возможно, закрепляется и передается следующим поколениям. Эти законы представляются важными при использовании микроорганизмов для палеогидрогеологических реконструкций, а также для характеристики современных условий формирования подземных вод. Они нашли свое отражение, в частности, при изучении условий формирования кислых и щелочных терм областей современного вулканизма [1].

Результаты изучения этих вод показали, что кислые сульфатные и хлоридные фумарольные воды не содержат термофильных бактерий. Это служит основанием для вывода, что исследованные воды представляют собой смесь естественных конденсатов высокотемпературных (200—300 °С) вулканических газов и грунтовых вод с температурой 5—10 °С, неблагоприятных для развития термофилов. Низкая температура грунтовых вод предопределила развитие в кислых термах только мезофильных бактерий.

Источники щелочных (и слабощелочных) хлоридных терм, приуроченные к зонам разломов, в питании которых участвуют инфильтрационные атмосферные воды, напротив, содержат термофильную (реже мезофильную) микрофлору. Это свидетельствует о том, что данные инфильтрационные воды длительно циркулируют в недрах, что и предопределило адаптацию бактерий к высокой температуре и накопление соответствующей информации.

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ

Микробиологические исследования вод различной минерализации (от 0,01 до 350 г/л и более) проводились в горноскладчатых областях и артезианских бассейнах.

В табл. 11 представлены данные максимальных активности и численности микроорганизмов в подземных водах горноскладчатых областей, где минерализация вод составляла от < 0,01 до 10 г/л. Сюда вошли сверхпресные, пресные, особо пресные, нормально пресные, пресноватые, слабосоленоватые и среднесоленые воды. Из табл. 11 видно, что сверхпресные воды (< 0,01 г/л) очень бедны микрофлорой. В них обнаружены лишь малоактивные аэробные тионовые бактерии и единичные клетки бактерий, растущих на белковых средах.

В пресных водах (до 0,1 г/л) активность тионовых бактерий возрастает. Появляются немногочисленные аммонифицирующие и малоактивные денитрифицирующие бактерии. Число бактерий, растущих на белковых средах, увеличивается до сотен клеток в 1 мл воды.

В особо пресных (0,1—0,3 г/л), нормально пресных (0,3—0,5 г/л) и пресноватых (0,5—1,0 г/л) водах число физиологических групп и их активность становятся еще выше. Наряду с активными

Активность и численность (максимальные) микроорганизмов в подземных водах с разной минерализацией (горноскладчатые области)

Группы вод (минерализация, г/л)	Аэробные		Факультативные денитрифицирующие		Анаэробные		Бактерии, растущие на белковых средах (число клеток в 1 мл)	Район исследования
	Аммонифицирующие (число клеток в 1 мл)	Тяговые (окислено N_2, S_2, O_2 , %)	Гетеротрофы (число клеток в 1 мл)	Миксотрофы (образовано NO_2^- , мг/л)	Сульфатвосстанавливающие	Водородпродуцирующие		
Сверхпресные (менее 0,01)	0	20	0	0	0	—	Единицы	Алданский щит
То же	0	20	0	0	0	—	0	Енисейский край
Пресные (до 0,1)	10	58	—	0	0	—	Сотни	То же
То же	10	25	10	2,4	0	—	„	Западный Сихотэ-Алинь
„	—	100	—	7,5	0	—	„	Горный Алтай
Особо пресные (0,1—0,3)	—	100	—	0	+	—	„	То же
То же	—	25	—	—	0	—	Десятки	Западный Сихотэ-Алинь
„	—	100	0	0	0	—	„	Западный Саян
„	100	75	—	30	0	—	„	Западный Танну-Ола
„	—	85	—	60	++	—	Десятки тысяч	Центральный Казахстан
Нормальные пресные (0,3—0,5)	—	100	—	30	0	—	Тысячи	Западный Танну-Ола
То же	100	33	—	До N_2	++	++	—	Горный Алтай
Пресноватые (0,5—1,0)	—	98	—	0	0	—	—	Забайкалье
То же	—	16	—	60	0	—	Тысячи	Западный Танну-Ола
„	100	100	—	До N_2	++	—	„	Тянь-Шань
„	—	100	—	30	+	—	Сотни тысяч	Центральный Казахстан
Слабосоленоватые (1,0—3,0)	—	100	—	75	0	—	Тысячи	Забайкалье
То же	100	100	—	24	++	++	Десятки тысяч	Западный Танну-Ола
Среднесоленые (3,0—10)	1000	100	—	7,5	+++	—	То же	Центральный Казахстан
То же	—	100	—	60	0	—	—	Западный Саян

аэробными и факультативными бактериями в этих водах получают развитие анаэробные сульфатовосстанавливающие бактерии. Число бактерий, растущих на белковых средах, достигает сотен тысяч клеток в 1 мл воды (пресноватые воды).

Слабосоленоватые (1,0—3 г/л) и среднесоленые (3,0—10 г/л) воды обогащены разнообразной и активной аэробной, факультативной и анаэробной микрофлорой. Число бактерий, растущих на белковых средах, достигает десятков тысяч в 1 мл воды.

В табл. 12 приведены данные о составе, активности и численности микроорганизмов (максимальные их показатели) в сильносоленых водах (10—35 г/л) Западно-Сибирского артезианского бассейна (южная часть), где они приурочены к меловым и юрским отложениям, залегающим на глубине 1000—3000 м в зонах затрудненного и весьма затрудненного водообмена. По химическому составу это хлоридные кальциево-натриевые воды, преимущественно метановые. Температура их 50—90 °С. Аэробные, окисляющие парафин бактерии одинаково активны как в менее (10—15 г/л), так и в более (30—35 г/л) минерализованных водах. Бактерии, окисляющие метан, приурочены к более минерализованным водам (25—35 г/л).

Число факультативных денитрифицирующих гетеротрофов с увеличением минерализации вод закономерно уменьшается (от 1 млн. клеток в 1 мл воды, имеющей минерализацию 10—15 г/л, до 10 тыс. клеток в том же объеме воды, минерализация которой 30—35 г/л). С увеличением минерализации вод закономерно уменьшается и число бактерий, растущих на белковых средах. Прямая зависимость наблюдается в отношении анаэробных водородпродуцирующих бактерий, число которых с увеличением минерализации вод увеличивается.

Сульфатовосстанавливающие бактерии одинаково распространены и активны в сильносоленых водах независимо от степени их минерализации. В табл. 13 приведены данные о составе, активности и численности микроорганизмов в сильносоленых водах и рассолах Бухаро-Каршинского артезианского бассейна. Сильносоленые воды (10—25 г/л) в этом бассейне приурочены к отложениям неокома, верхнего турона, сена и палеоцена (глубина их залегания от 355 до 1115 м), весьма слабые (до 70 г/л) и слабые (95—100 г/л) рассолы — к отложениям юры (глубина их залегания 1302—1335 м). Температура подземных вод бассейна в пределах глубин 100—1340 м изменяется от 21 до 65,5 °С [45].

Наиболее населены микрофлорой сильносоленые воды. В них присутствуют и находятся в активном состоянии аэробные, факультативные и анаэробные бактерии. По мере увеличения минерализации сильносоленых вод от 10—15 до 20—25 г/л число аэробных аммонифицирующих бактерий уменьшается. Уменьшается при этом число бактерий, растущих на белковых средах, и снижается активность факультативных денитрифицирующих гетеротрофов. Остаются постоянными содержание и активность сульфатовосстанавливающих бактерий.

Активность и численность микроорганизмов в сильносоленых водах Западно-Сибирского артезианского бассейна

Минерализация, г/л	Интервал опробования, м	Аэробные, окисляющие углекислоты (число клеток в 1 мл)		Факультативные денитрифицирующие гетеротрофы (число клеток в 1 мл)	Анаэробные		Бактерии, растущие на белковых средах (число клеток в 1 мл)
		Парафин	Метан		Сульфатовосстанавливающие	Водородпродуцирующие (число клеток в 1 мл)	
10—15	620—622	1000	0	>1 000 000	0	0	Миллионы
15—20	710—1256	1000	0	1 000 000	+++	100	Сотни тысяч
20—25	1319—1827	1000	0	1 000 000	++	Не опр.	То же
25—30	2102—2225	1000	1000	100 000	++	100	"
>30	2724—3001,5	1000	1000	10 000	+++	>1000	Десятки тысяч

Таблица 13

Активность и численность микроорганизмов в сильносоленых водах и рассолах Бухаро-Каршинского артезианского бассейна

Воды	Минерализация, г/л	Интервал опробования, м	Аэробные		Факультативные денитрифицирующие		Анаэробные		Бактерии, растущие на белковых средах (МПА)
			Аммонифицирующие (число клеток в 1 мл)	Тионовые	Гетеротрофы (число клеток в 1 мл)	Миксотрофы	Сульфатовосстанавливающие	Водородпродуцирующие	
Сильносоленые	10—15	355—533	10 000	++	100	+++	++	Не опр.	Сотни тысяч
	15—20	874—1030	1 000	+++	>10 000	+	+++	"	Десятки тысяч
	20—25	1132—1153	100	++	>1 000	+	+++	"	То же
Весьма слабые рассолы	70	1302—1334	0	++	0	+	++	"	Десятки
Слабые рассолы	95—100	1312—1329	100	0	0	+	+++	++	"

Рассолы (весьма слабые и слабые) Бухаро-Каршинского бассейна значительно беднее микрофлорой, чем сильносоленые воды этого же бассейна. Обеднение рассолов микрофлорой происходит в первую очередь за счет исчезновения аэробных и отчасти факультативных бактерий. Анаэробные же бактерии в рассолах сохраняются и характеризуются высокой активностью.

В сильносоленых водах и рассолах Сурхандарьинского артезианского бассейна (табл. 14), согласно Л. С. Балашову [1960 г.], водоносные горизонты связаны с породами эоценового и палеоценового возраста и разделены водоупорными пластами глин, гипсов и ангидритов. В центральной части бассейна распространены высоконапорные горячие рассолы хлоридного кальциево-натриевого состава с низким содержанием SO_4^{2-} и HCO_3^- . В сводовых частях ряда брахиантиклинальных структур водоносные горизонты меловых отложений значительно приближены к поверхности и вскрываются здесь буровыми скважинами.

Сильносоленые воды бассейна населены аэробной (тионовые бактерии), факультативной (денитрифицирующие гетеротрофы) и анаэробной (сульфатвосстанавливающие бактерии) микрофлорой. Примерно такой же состав микроорганизмов сохраняется и в весьма слабых рассолах (45—65 г/кг). В рассолах с минерализацией 75—135 г/л происходит резкая смена состава микрофлоры. Аэробные бактерии полностью исчезают. Факультативные денитрифицирующие гетеротрофы также обнаружены. При минерализации воды 75—115 г/л активно развиваются факультативные денитрифицирующие миксотрофы и сульфатвосстанавливающие бактерии. В крепких рассолах (236 г/л) бассейна бактерии не выявлены.

В пределах Западно-Туркменского артезианского бассейна (табл. 15) исследовались воды нефтяных месторождений Небит-Даг, Челекен и Боя-Даг, приуроченные к толще плиоценовых и четвертичных песчано-глинистых пород. В этих отложениях сильносоленые и рассольные воды распространены на глубине от 500 до 2000 м и более. Температура их до 65 °С [10, Юргелянц Э. Н., 1961 г.]. Сильносоленые воды (20—30 г/л) месторождения Небит-Даг обильно населены разнообразной микрофлорой [10]. Здесь в большом количестве и в активном состоянии обнаружены аэробные аммонифицирующие, факультативные денитрифицирующие (гетеротрофы и миксотрофы), а также анаэробные сульфатвосстанавливающие бактерии. Число бактерий, растущих на белковых средах, довольно велико (тысячи клеток в 1 мл воды). По мере увеличения минерализации исследованных вод количество бактерий, а также содержание физиологических групп и активность микроорганизмов уменьшаются.

В весьма слабых рассолах (50—55 г/л) количество бактерий, растущих на белковых средах, снижается до единиц в 1 мл. Аэробные и факультативные бактерии не обнаружены. Вместе с тем здесь активно развиваются анаэробные сульфатвосстанов-

Активность и численность микроорганизмов в сильносоленых водах и рассолах Сурхандарьинского артезианского бассейна

Воды	Минерализация, г/л	Интервал опробования, м	Аэробные тиоповые (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, %)	Факультативные денитрифицирующие		Анаэробные сульфатовосстанавливающие	Бактерии, растущие на белковых средах (число клеток в 1 мл)
				Гетеротрофы (число клеток в 1 мл)	Миксотрофы (образовано NO_2^- , мг/л)		
Сильносоленые	15—20	894—989	100	100	0	+++	Десятки
Весьма слабые рассолы	45—50	1028—1038	0	0	До N_2	+++	„
То же	50—55	1027—1190	100	1000	До N_2	+++	Сотни
„	60—65	1045—1088	35	10	15	+++	„
Слабые рассолы	75—80	1226—1230	0	0	60	++	Единицы
То же	100—105	1249—1272	0	0	До N_2	+++	0
„	105—110	1232—1267	0	0	До N_2	++	Единицы
„	110—115	1245—1428	0	0	До N_2	+++	0
„	115—120	1245—1300	0	0	15	+	Единицы
„	130—135	—	0	0	7,5	0	0
Крепкие рассолы	236	—	0	0	0	0	0

Активность и численность микроорганизмов в сильносоленых водах и рассолах Западно-Туркменского артезианского бассейна

Группа вод	Интервал опробования, м	Минерализация, г/л	Аэробные		Факультативные денитрифицирующие		Анаэробные		Бактерии, растущие на белковых средах (число клеток в 1 мл)
			Аммонифицирующие (число клеток в 1 мл)	Тионовые (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, %)	Гетеротрофы (число клеток в 1 мл)	Миксотрофы (образовано NO_2^- , мг/л)	Сульфатвосстанавливающие	Водородпродуцирующие	
Месторождение Небит-Даг									
Сильносоленые воды	1610—2000	20—25	10 000	100	1000	30	+++	0	Тысячи
		25—30	10 000	100	10	75	+++	0	"
Весьма слабые рассолы	1103—2130	35—40	100	11	0	100	+	Не опр.	Тысячи
		45—50	1 000	67	0	0	+	То же	"
		50—55	0	0	0	0	+++	0	Единицы
Слабые рассолы	479—1465	85—90	10	0	10	0	+	0	Единицы
		105—120	0	0	0	0	0	0	"
Крепкие рассолы	672—674	168,1	10	0	0	0	+	0	Тысячи
Месторождение Челекен									
Сильносоленые воды	872—908	20—35	0	9,0	0	1,5	+++	Не опр.	Десятки
Весьма слабые рассолы	1072—1364	35—40	Единицы	100	0	7,5	+++	То же	Сотни
		40—45	"	80	0	9,0	+++	"	Единицы
		55—60	"	0	0	0	+++	"	Сотни
Слабые рассолы	—	90—100	"	0	0	1,5	+++	+	"
Крепкие рассолы	790—821	243,5	0	0	0	0,5	+	0	Десятки
Месторождение Боя-Даг									
Крепкие рассолы	Восходящие источники	180—200	10	0	10	0	0	Не опр.	0
		200—220	10	0	10	7,5	0	То же	Десятки
		220—270	0	0	0	7,5	0	"	0
Сверхкрепкие рассолы	То же	326	10	44	0	0,6	+	"	Десятки

ливающие бактерии. В более минерализованных рассолах активность сульфатвосстанавливающих бактерий также уменьшается.

Сильносоленые воды месторождения Челекен в целом слабо населены микрофлорой. Аэробные и факультативные бактерии в них отсутствуют, но активно развиты сульфатвосстанавливающие. Последние также активно развиты и в весьма слабых и слабых рассолах. В слабых рассолах (90—100 г/л) в активном состоянии выявлены водородпродуцирующие бактерии. Крепкие рассолы (243,5 г/л) содержат небольшое количество бактерий, растущих на белковых средах (десятки клеток в 1 мл рассола). В крепких и сверхкрепких рассолах месторождения Боя-Даг (восходящие источники) обнаружены разные физиологические группы бактерий, но все они находятся в малоактивном состоянии.

Исследования Восточно-Сибирского артезианского бассейна (табл. 16) приурочены к кембрийским и мезозойским породам. Они находятся на глубинах от 100—300 до 2200—2220 м. Температура от 2—8 (в верхних частях разреза) до 50—60 °С (на глубине) [66, Басков Е. А., Зайцев И. К., 1963 г.; Пиннекер Е. В., 1966 г.].

Весьма слабые рассолы бассейна (35—70 г/л), полученные с глубины 100—300 м, содержат разнообразную микрофлору. В них обнаружены тионовые денитрифицирующие гетеротрофы и миксотрофы, сульфатвосстанавливающие и водородпродуцирующие бактерии. В рассолах той же минерализации, но полученных с глубины 2000—3000 м, выявлены денитрифицирующие и сульфатвосстанавливающие бактерии. Другие группы бактерий здесь не выявлены.

В слабых рассолах (100—140 г/л) обнаружены активные водородпродуцирующие бактерии и бактерии, растущие на белковых средах. В крепких (347 г/л) и сверхкрепких (600 г/л) рассолах бактерии не обнаружены, но в одном случае исключение составили сверхкрепкие рассолы с минерализацией 451 г/л. В них выявлены малоактивные сульфатвосстанавливающие бактерии.

Таким образом, неблагоприятны для развития бактерий как слабоминерализованные (сверхпресные) подземные воды, так и сильноминерализованные (весьма крепкие и сверхкрепкие) рассолы. В них бактерии малоактивны, малочисленны или отсутствуют (табл. 17).

В остальных, разных по минерализации водах микроорганизмы (различные физиологические группы) широко распространены и активны. Для каждой физиологической группы существуют свои пределы минерализации, при которой они либо наиболее активны, либо более многочисленны. Так, для активного развития аэробных тионовых бактерий благоприятны воды от II до IX подгрупп, для аммонифицирующих — от IV до IX. Факультативные денитрифицирующие гетеротрофы более многочисленны в подгруппах III—IX, а денитрифицирующие миксотрофы активнее в III—X. Для анаэробных сульфатвосстанавливающих бактерий благоприятны воды от III до XI подгрупп, а для водородпродуцирующих — от IV до

Активность и численность микроорганизмов в рассо

Рассолы	Минерализация, г/л	Интервал опробования, м	Аэробные тионовые (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, %)
То же	35—70	2000—3000	Не опр.
Слабые	100—140	100—300	0
Весьма крепкие	347	1790—1850	0
Сверхкрепкие	451	2200—2220	0
	600	1122—1133	0

лах Восточно-Сибирской артезианской области

Факультативные денитрифицирующие (число клеток в 1 мл)		Анаэробные		Бактерии, растущие на белковых средах (число клеток в 1 мл)
Гетеротрофы	Миксотрофы	Сульфат-восстанавливающие	Водород-продуцирующие	
1000	1000	+++	++	Не опр
1000	Не опр.	++	Не опр.	То же
Не опр.	0	0	++	Сотни
0	0	0	0	0
0	0	+	0	0
0	0	0	0	0

Активность и численность (максимальные) микроорганизмов

Группы вод	Под-группы	Наименование вод по степени минерализации [43]	Минерализация, г/л	Аэробные	
				Аммонифицирующие (число клеток в 1 мл)	Тионовые (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, %)
Пресные (менее 1 г/л)	I	Сверхпресные	0,01	0	20
	II	Пресные	До 0,1	10	100
	III	Особо пресные	0,1—0,3	100	100
	IV	Нормально пресные	0,3—0,5	1 000	100
	V	Пресноватые	0,5—1,0	—	100
Соленые (1,0—35 г/л)	VI	Слабосоленоватые	1—3	1 000	100
	VII	Среднесоленые	3—10	1 000	100
	VIII	Сильносоленые	10—35	10 000	100
Рассолы (более 35 г/кг)	IX	Весьма слабые	35—70	1 000	100
	X	Слабые	70—140	100	0
	XI	Крепкие	140—270	10	0
	XII	Весьма крепкие	270—350	10	0
	XIII	Сверхкрепкие	>350	0	0

Таблица 17

в подземных водах с разной степенью минерализации

Окисляющие углеводороды (число клеток в 1 мл)	Факультативные денитрифицирующие		Анаэробные		Бактерии, растущие на белковых средах (число клеток в 1 мл)
	Гетеротрофы (число клеток в 1 мл)	Миксотрофы (образовано NO_2 , мг/л)	Сульфат-восстанавливающие	Водород-продуцирующие	
—	0	0	0	—	Единицы
—	10	7,5	0	—	Сотни
0	1 000	60	++	—	Десятки тысяч
0	1 000	До N_2	++	++	То же
0	10 000	До N_2	++	++	Сотни тысяч
—	10 000	100	++	++	Десятки тысяч
00	10 000	100	+++	+++	То же
00	1 000 000	75	+++	++	Миллионы
—	1 000	До N_2	+++	++	Сотни
—	0	До N_2	+++	+++	»
—	0	7,5	++	0	Тысячи, десятки
—	0	0	+	0	Десятки
—	0	0	+	0	0

X. Бактерии, растущие на белковых средах, более многочисленны в пределах II—XI подгрупп (табл. 18).

Из приведенных данных также видно, что в зависимости от степени минерализации в каждой группе подземных вод формируются бактериальные ценозы, характеризующиеся разными биохимическими функциями. Различие этих функций хорошо прослеживается при рассмотрении состава бактерий, населяющих подземные воды складчатых областей (массивов) и артезианских бассейнов. Так, из табл. 18 видно, что в свехпресных и пресных водах массивов формируются биоценозы только с окислительными биохимическими функциями (тионовые, аммонифицирующие бактерии). По мере увеличения минерализации появляются микроорганизмы, которые могут переходить от окислительных биохимических функций к восстановительным (факультативно-анаэробные денитрифицирующие миксотрофы и гетеротрофы).

Бактерии, характеризующиеся восстановительными биохимическими функциями (сульфатвосстанавливающие, водородпродуцирующие), присущи главным образом водам артезианских бассейнов. Известно, что в большинстве гидрогеологических структур минерализация воды возрастает по мере увеличения глубины ее распространения, хотя и в разной степени. Вместе с минерализацией и глубиной повышается и температура подземных вод [15]. Следовательно, в нормальных гидрохимических разрезах на микрофлору подземных вод одновременно влияют по крайней мере три взаимосвязанных фактора: глубина, температура и минерализация воды. Совместное влияние этих факторов на микрофлору подземных вод можно проследить при изучении гидрохимических разрезов, в которых минерализация воды с глубиной мало изменяется, а температура закономерно возрастает. К числу бассейнов с таким разрезом относится Западно-Сибирский [11, 15, 57].

В исследованной нами южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна на глубине 700—3000 м распространены сильносоленые (15—31 г/л) подземные воды. Их температура колеблется от 43 до 83 °С [11, 57]. Данные о составе аэробных, факультативных и анаэробных микроорганизмов в этих водах, взятых с разных глубин, температура которых изменяется в широких пределах, показывают (табл. 19), что процент встречаемости аэробных микроорганизмов с увеличением температуры (и глубины) закономерно уменьшается (хотя и не очень значительно). Встречаемость факультативных бактерий с увеличением температуры воды также уменьшается, но затем с увеличением глубины и температуры вод снова возрастает. Этот спад в развитии факультативных микроорганизмов при 50—60 °С может быть связан с перестройкой их физиологических свойств (ферментативных систем и др.) именно в данных температурных пределах, что и позволяет бактериям развиваться в дальнейшем при более высоких температурах. Но могут быть и другие, неизвестные нам причины. Процент встречаемости анаэробных бактерий с увеличением

Бактериальные ценозы и их активность в подземных водах

Микроорганизмы	Пресные воды массивов				Соленые воды массивов и бассейнов				Рассолы бассейнов				
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Аэробные:													
аммонифицирующие	0	+	++	+++	-	+++	+++	++++	+++	++	+	+	0
тионовые	++	++++*	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	0	0	0	0
Факультативные денитрифицирующие:													
гетеротрофы	0	+	+++	+++	++++	++++	++++	++++	+++	0	0	0	0
миксотрофы	0	+	+++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	+	0	0
Анаэробные:													
сульфатвосстанавливающие	0	0	+++	+++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	+++	+	+
водородпродуцирующие	-	-	+	+++	+++	++++	++++	+++	+++	++++	0	0	0
Бактерии, растущие на белковых средах	+	++	++	++++	++++	++++	++++	++++	++	++	++	+	0

температуры и глубины возрастает, что связано с известными физиологическими свойствами этих микроорганизмов: их анаэробностью и термофильностью.

Таблица 19

Встречаемость микроорганизмов, %, в сильносоленых водах Западно-Сибирского артезианского бассейна при разных температурах и глубинах

Температура воды, °С	Глубина опробования, м	Микроорганизмы		
		Аэробные	Факультативные	Анаэробные
43—50	До 1000	50	75	25
50—60	До 2000	44	55	22
74—83	3000	37	75	75

Таким образом, все рассмотренные факторы: минерализация, глубина и температура подземных вод — действуют на состав, активность, численность микрофлоры в артезианских бассейнах в одном направлении. Высокая минерализация воды, равно как и глубина и температура, ограничивает развитие аэробных микроорганизмов, но не угнетает (до определенных пределов) жизнедеятельность факультативных и анаэробных. Более того, в ряде случаев факультативные и анаэробные бактерии усиливают свою активность на больших глубинах и при более высоких температурах.

Если в артезианских бассейнах с нормальными гидрохимическими разрезами состав и активность микроорганизмов изменяются в указанном направлении в соответствии с изменением степени минерализации, глубины и температуры вод, то в бассейнах с инверсионными гидрохимическими разрезами такого соответствия не наблюдается.

Западно-Туркменский артезианский бассейн характеризуется инверсионным гидрогеологическим разрезом. Здесь соответствия между глубиной и минерализацией воды не наблюдается, т. е. воды, находящиеся на меньшей глубине, более минерализованные, а на большей отличаются меньшей минерализацией (см. табл. 15). Это несоответствие сказывается и на содержании в водах микроорганизмов. Из табл. 15 видно, что крепкие рассолы месторождения Челекен, находящиеся на глубине 790—821 м, практически бактерий не содержат, в то время как в весьма слабых и слабых рассолах, находящихся на глубине 1072—1343 м, бактерии активно развиваются. То же наблюдается и на месторождении Небит-Даг, где сильносоленые воды (20—30 г/л) на глубине 1610—2000 м обогащены микроорганизмами, а крепкие (168 г/л) и слабые (85—120 г/л) рассолы на глубинах 672—674 и 479—1465 м обеднены ими.

Величина рН, являющаяся мерой активной кислотности среды, оказывает большое влияние на развитие и жизнедеятельность микроорганизмов, воздействуя на них двумя путями. Первый путь — это непосредственное действие ионов водорода H^+ и гидроксильных ионов OH^- на живую клетку (протоплазму, ферменты). Второй путь косвенный, когда рН регулирует концентрацию и степень диссоциации веществ, имеющих существенное значение для обмена веществ микроорганизмов. Например, известно, что железо, участвующее в обмене веществ многих микроорганизмов, изменяет концентрацию в растворе в зависимости от значений рН. В кислой среде оно находится в ионной форме и поэтому легко усваивается микроорганизмами, в щелочной, наоборот, образует слаборастворимый гидрат окиси, который сохраняется в растворе в микроколичествах. В другом случае, когда в обмен включаются органические кислоты, их формы нахождения также изменяются в зависимости от рН. При кислом значении рН кислоты находятся в виде недиссоциированных молекул, токсичных для некоторых микроорганизмов. В нейтральной или щелочной среде соли слабых кислот сильно диссоциированы и легко усваиваются микроорганизмами. Для каждой кислоты и соли есть своя критическая зона, когда они переходят из диссоциированного состояния в недиссоциированное. Поэтому в зависимости от рН микроорганизмы имеют дело с молекулами или с ионами, что в ряде случаев для них безразлично [Работнова И. Л., 1957 г., 1966 г.].

Буфером, создающим то или иное значение рН, являются карбонаты. При разных соотношениях CO_2 , HCO_3^- , и CO_3^{2-} значения рН меняются. Существуют микроорганизмы кислотолюбивые, приспособившиеся к жизни в кислой среде, и щелочелюбивые, живущие в щелочной среде. Представителями первых являются некоторые виды тионовых бактерий (*T. thiooxidans*, *T. ferrooxidans*), вторых — серобактерии, гнилостные (растущие на белковых средах), а также тионовые (*T. trautweinii*) и др. Основная же масса микроорганизмов предпочитает нейтральную реакцию среды. Отношение бактерий, обитающих в подземных водах, к различным значениям рН изучалось на примере вод, характеризующихся кислой (рН = 1 ÷ 3), слабокислой (рН = 4 ÷ 6), нейтральной (рН = 7,0), слабощелочной (рН = 8 ÷ 10) и щелочной (рН = 11 ÷ 14) реакциями (табл. 20) [Алексин О. А., 1952 г.]. Исследования показали, что кислые воды областей современного вулканизма (Курильские острова) и сульфидных месторождений (Средний Урал, Забайкалье, Западный Саян) характеризуются присутствием только аэробных тионовых бактерий, растущих как на кислой, так и на щелочной среде. Число бактерий, выявленных на белковых средах (аммонифицирующие, растущие на МПА), незначительное (не превышает десятков клеток в 1 мл воды).

Активность и численность (максимальные) микроорганизмов в подземных водах при различных значениях pH

pH исследованных вод	Аэробные			Факультативные денитрифицирующие		Анаэробные		Растущие продуцирую- щие (число клеток в 1 мл)	Район исследования
	Аммони- фициру- ющие (число клеток в 1 мл)	Тионовые (окислено Na ₂ S ₂ O ₃ , %)		Гетеро- трофы (число клеток в 1 мл)	Миксо- трофы (образо- вано NO ₂ ⁻ , мг/л)	Сульфат- восста- навлива- ющие	Водород- продуци- рующие (число клеток в 1 мл)		
		На кислой среде	На слабоще- лочной среде						

Кислая реакция (pH=1÷3)

0,64	0	20	43	0	0	0	—	0	Курильские острова Средний Урал (медноколчедан- ные месторождения) Курильские острова Западный Саян (медноколче- данные месторождения) Забайкалье Курильские острова
1,88—2,95	0	100	70	0	0	0	—	—	
2,47—2,55	—	100	13	0	0	0	—	Единицы	
2,6—2,9	Единицы	100	50	0	0	0	0	—	
3,05	—	100	0	—	0	0	—	—	
3,08	—	49	0	—	0	0	—	Десятки	

Слабокислая реакция (pH=4÷6)

4,0—4,2	—	70	50	—	3,5	0	—	Сотни	Забайкалье Казахстан Курильские острова Дальний Восток
4,4—4,5	1000	100	100	—	105	++	—	Тысячи	
4,0—5,2	100	50	25	—	7,5	+++	—	—	
4,0—5,2	—	57	100	—	5,0	+++	—	—	

5,2—5,3	—	100	15	—	112	0	—	—	Средний Урал Казахстан Забайкалье
5,4	—	100	100	—	3,0	+++	—	Сотни	
5,5—6,0	—	100	100	—	7,5	+	—	Тысячи	

Нейтральная реакция (pH=7,0)

6,9—7,2	—	100	100	—	75	+++	—	Тысячи	Забайкалье Горный Алтай Западный Саян и Западный Танну-Ола Казахстан
6,9—7,2	—	100	100	—	До N ₂	+++	1000	Тысячи	
6,9—7,2	—	100	100	—	60	++	—	—	
6,9—7,2	—	100	100	—	90	+++	—	—	Казахстан Восточно-Сибирский бассейн
6,9—7,2	10 000	—	100	10 000	60	+++	10 000	Десятки тысяч	
7,0—7,2	10 000	100	100	100	90	+++	1 000	Сотни тысяч	Бухаро-Каршинский бассейн
7,0—7,2	—	100	100	10 000	—	+++	1 000	Миллионы	Западно-Сибирский бассейн

Слабощелочная реакция (pH=8÷10)

7,5—8,4	—	—	100	10 000	—	+++	1000	Сотни тысяч	Западно-Сибирский бассейн Бухаро-Каршинский бассейн
7,5—8,4	1000	100	100	100	60	+++	—		
7,5—8,4	—	100	100	—	75	+++	—	То же Десятки тысяч	Казахстан Восточно-Сибирский бассейн
7,5—7,8	1000	100	100	10 000	90	—	1000		
8,9—9,4	—	0	0	—	—	+	0	Десятки	Западно-Сибирский бассейн

Щелочная реакция (pH=11÷14)

11,05	0	0	0	—	60	0	—	0	Бухаро-Каршинский бассейн
-------	---	---	---	---	----	---	---	---	---------------------------

В подземных водах тех же районов и других со слабокислой реакцией число физиологических групп, их активность и численность заметно возрастают. В этих водах появляются факультативные тионовые бактерии (миксотрофы), а также анаэробные сульфатовосстанавливающие. Число бактерий, растущих на белковых средах, определяется сотнями и тысячами клеток в 1 мл.

Еще богаче и разнообразнее микрофлора нейтральных вод. Здесь обитают и характеризуются высокой активностью и численностью все выявлявшиеся нами бактерии (аэробные, факультативные и анаэробные). Число бактерий, растущих на белковых средах, достигает миллионов клеток в 1 мл воды.

В водах со слабощелочной реакцией, где рН не более 8,4, состав бактерий, их активность и численность остаются примерно такими же, как и в нейтральных водах. Однако с увеличением рН до 8,9—9,4 картина резко меняется. Тионовые бактерии из состава вод исчезают, выявляются малоактивные сульфатовосстанавливающие бактерии, а число бактерий, растущих на белковых средах, падает до десятков клеток в 1 мл воды. Такие воды встречаются в Западно-Сибирском артезианском бассейне. Воды со щелочной реакцией (рН = 11,05), обнаруженные в Бухаро-Каршинском артезианском бассейне, характеризуются присутствием только денитрифицирующих миксотрофов. Остальные бактерии здесь не выявлены.

Исследования показывают, что под влиянием рН в подземных водах формируются разные бактериальные ценозы. Разница в их составе и активности наиболее ярко выражена при крайних значениях рН, т. е. в кислых и щелочных водах, где развиваются соответственно кислотолюбивые аэробы и щелочелюбивые или предпочитающие нейтральную реакцию среды факультативные бактерии. В остальных (слабокислых, нейтральных и слабощелочных) водах обнаруживаются бактерии, характеризующиеся разным отношением к рН. Развитие некоторых из них протекает в подземных водах далеко за пределами известных для них оптимальных значений рН.

Наши исследования показали, что большое влияние на распространение тионовых бактерий в подземных водах с разными значениями рН оказывает рудная минерализация. В присутствии рудной (сульфидной) минерализации независимо от рН подземных вод могут быть обнаружены как кислотолюбивые, так и щелочелюбивые тионовые бактерии. Так, например, в кислых водах Дегтярского медноколчеданного месторождения обнаружен щелочелюбивый *T. trautweinii* (оптимум рН = 7 ÷ 8,5, пределы 6—10), а в нейтральных и щелочных водах Гумишевского и Пышминско-Ключевского медно-кобальтового месторождения — кислотолюбивые *T. ferrooxidans* (оптимум рН = 1,8 ÷ 3,5, пределы 1,5—4,8) и *T. thiooxidans* (оптимум рН = 2,5 ÷ 3,5, пределы 0,5—5,0) [31].

Очевидно, рудная минерализация, которая служит источником

энергии для тионовых бактерий, способствует адаптации этих микроорганизмов к значениям рН подземных вод.

Таким образом, микроорганизмы в подземных водах живут и развиваются в широких температурных пределах, при различных значениях минерализации и рН. Многие из них выдерживают экстремальные условия жизни: высокую температуру, высокую минерализацию, низкие и высокие значения рН. Вероятно, температурным пределом развития микроорганизмов в подземных водах следует считать 100 °С. Предел минерализации, при котором проявляется слабая жизнедеятельность микроорганизмов, 270 г/кг или 300 г/л.

Под влиянием физико-химических факторов происходит селекция микроорганизмов в подземных водах. В низкотемпературных слобоминерализованных водах с низкими значениями рН (складчатые области и массивы) развиваются аэробные бактерии, характеризующиеся окислительными биохимическими функциями (в частности, тионовые). Высокотемпературные сильноминерализованные воды с высокими значениями рН (артезианские бассейны) содержат анаэробные бактерии, характеризующиеся восстановительными биохимическими функциями (в частности, сульфатвосстанавливающие).

В соответствии с таким распределением микроорганизмов в подземных водах с разными температурами, минерализацией и рН должны протекать разные окислительно-восстановительные биохимические процессы. В водах с низкими значениями температуры, минерализации и рН будут протекать в основном окислительные биохимические процессы, в водах с высокими значениями указанных параметров — восстановительные биохимические.

Микроорганизмы, обитающие в подземных водах, адаптируются к условиям среды своего существования. Наиболее выражена адаптация тионовых бактерий к различным значениям рН. Развитие тионовых бактерий (*T. thiooxidans*, *T. trautweinii*) в подземных водах протекает далеко за пределами известных для них оптимальных значений рН, установленных в лабораторных условиях. Известно, что микроорганизмы способны изменять значение рН в нужном для себя направлении [Работнова И. Л., 1957 г.]. Положительное влияние на адаптацию тионовых бактерий к различным значениям рН оказывают источники энергии, в частности рудная минерализация. В присутствии рудной сульфидной минерализации кислотолюбивые виды тионовых бактерий могут развиваться в нейтральных, а иногда и в щелочных водах, а щелочелюбивые способны жить в кислых, а иногда и сильнокислых.

В работах последних лет по геохимической экологии показано, что адаптация микроорганизмов проявляется не только к физико-химическим факторам среды, но и к геохимическим. Так, при изучении поведения микроорганизмов, обитающих в почвах и иловых отложениях биогеохимических провинций, обогащенных кобаль-

том, молибденом, медью, цинком, марганцем, бором, селеном и бедных этими элементами, установлено, что в экстремальных геохимических условиях формируются микробные ассоциации, приспособленные к высоким концентрациям указанных элементов [39].

В подземных водах также наблюдается адаптация бактерий к высоким концентрациям рудных элементов, что хорошо видно на примере рудничных вод Дегтярского месторождения, где содержание меди и цинка достигает 5135, марганца 209, железа 3775 мг/л и более. В этих водах некоторые виды тионовых бактерий характеризуются высокой активностью [31].

**ГИДРОБИОХИМИЧЕСКАЯ
ЗОНАЛЬНОСТЬ**

Обобщение результатов изучения регионального распространения микроорганизмов в системе вода — порода на территории СССР показало, что между микроорганизмами и средой их обитания существует тесная взаимосвязь. Особенно четко она проявляется по отношению к источникам энергии (донорам и внешним акцепторам электронов) — веществам, вступающим в окислительно-восстановительные биохимические реакции. Микроорганизмы по-разному относятся к источникам энергии. Это определяет их специфику и зональное распределение в подземных водах. Так, в зависимости от отношения микроорганизмов к свободному и связанному кислороду (внешние акцепторы электронов) микроорганизмы закономерно (зонально) распределяются в подземных водах.

В пределах той части земной коры, где возможна бактериальная жизнь (температура до 100 °С, минерализация воды до 300 г/л), можно выделить следующие зоны: аэробную (I), смешанную (II), анаэробную (III). За пределами указанных температур и минерализации воды, где бактериальная жизнь в настоящее время не протекает, находится зона отсутствия бактерий (IV) [27].

Каждая из гидробиохимических зон характеризуется определенным групповым и видовым составом микроорганизмов и соответствующими продуктами их жизнедеятельности, которые являются признаками направленности окислительно-восстановительных геохимических процессов в этих зонах (табл. 21).

Аэробная гидробиохимическая зона характеризуется тем, что в ней живут и проявляют геохимическую деятельность микроорганизмы, использующие в качестве внешних акцепторов электронов только свободный кислород, т. е. аэробные бактерии (тионовые, метанооксиляющие и др.). Кроме того, могут быть обнаружены также и факультативно-анаэробные бактерии, в частности денитрифицирующие. В этой зоне протекают окислительные биогеохимические процессы. Продуктами жизнедеятельности здесь являются различные окисные формы углерода, азота, серы. Металлам зоны присуща наивысшая валентность. Зона благоприятна для перехода рудных элементов из пород в природные воды и их водной миграции.

В смешанной зоне развиваются бактерии, использующие в качестве внешних акцепторов электронов не только свободный, но и связанный кислород в форме сульфатов, нитратов, углекислоты (аэробные, факультативно-аэробные и анаэробные бактерии). Из анаэробных в указанной зоне чаще всего выявляются сульфат-

Схема гидробиохимической зональности земной коры

Зоны	Микроорганизмы (примеры)	Внешние акцепторы электронов	Продукты жизнедеятельности бактерий	K *	Eh, мВ	Гидродинамические этажи	Зоны (генезис вод, по И. К. Зайцеву)
Аэробная (I)	Тионовые	O ₂	SO ₄ , окисные формы металлов	До ∞	+800 ÷ +100	Верхний	Свободного водообмена (инфильтрационные, преимущественно слабоминерализованные кислородно-азотные, гидрокарбонатные, кальциевые, а также сульфатные, преимущественно холодные воды)
	Нитрифицирующие	O ₂	NO ₃ , NO ₂				
	Метаноокисляющие	O ₂	CO ₂ , H ₂ O				
	Водородокисляющие	O ₂	H ₂ O				
Смешанная (II)	Тионовые	O ₂	SO ₄ , окисные формы металлов	В пределах I	+100 ÷ -200	Верхний	Переходная от свободного к затрудненному водообмену (преимущественно инфильтрационные пресные и слабосоленые воды разного химического состава, холодные и термальные)
	Нитрифицирующие	O ₂	NO ₃ , NO ₂				
	Водородокисляющие	O ₂	H ₂ O				
	Денитрифицирующие	NO ₃ , NO ₂	N ₂ , CO ₂				
	Сульфатвосстанавливающие	SO ₄	H ₂ S, восстановленные формы металлов				
Анаэробная (III)	Метанпродуцирующие	CO ₂	CH ₄	До 0	-200 ÷ -400 и ниже	Верхний	Затрудненного водообмена (инфильтрационные и седиментогенные воды, преимущественно сильноминерализованные, азотно-метановые, сульфатно-хлоридные и хлоридные натриевые, ниже другие, преимущественно термальные)
	Водородпродуцирующие	—	H ₂				
	Сульфатвосстанавливающие	SO ₄	H ₂ S восстановленные формы металлов				
	Денитрифицирующие	NO ₃ , NO ₂	N ₂ , CO ₂				
Отсутствия бактерий (IV)	Метанпродуцирующие	CO ₂	CH ₄			Нижний	Весьма затрудненного водообмена (преимущественно седиментогенные воды, в наиболее глубоких частях метаморфогенные, преимущественно высоких температур и минерализации, хлоридные, разного катионного состава, метановые, углекисло-метановые и др.)
	Водородпродуцирующие	—	H ₂				
	Не обнаруживаются	CO ₂ (чаще всего)	CH ₄ , N ₂ , H ₂ S восстановленные формы металлов				

* Коэффициент аэробности среды (отношение встречаемости, %, аэробных бактерий к анаэробным).

восстанавливающие бактерии. В этой зоне протекают как окислительные, так и восстановительные биогеохимические процессы. Продуктами жизнедеятельности микроорганизмов здесь являются окисные и восстановленные формы углерода, азота, серы. В этой зоне происходит как миграция, так и концентрация рудных элементов.

Анаэробная гидробиохимическая зона характеризуется развитием бактерий, использующих в качестве внешних акцепторов только связанный кислород (анаэробные бактерии — сульфатвосстанавливающие, метанобразующие). В этой зоне протекают восстановительные биогеохимические процессы. Продуктами жизнедеятельности микроорганизмов являются восстановленные формы углерода, азота, серы. Металлы здесь обнаруживаются в своей низшей валентности. Зона благоприятна для перехода рудных элементов из подземных вод в породы.

В зоне отсутствия бактерий, где в настоящее время биохимические процессы не протекают, продукты жизнедеятельности микроорганизмов иногда обнаруживаются, что, по-видимому, свидетельствует о биогеохимических процессах, протекавших здесь в геологическом прошлом.

Выделенная гидробиохимическая зональность согласуется с известной геохимической зональностью, что вполне закономерно, так как обе зональности (геохимическая и гидробиохимическая) формируются под влиянием микроорганизмов. Об этом свидетельствуют геохимические критерии, характеризующие различные геохимические зоны: окислительную, переходную, восстановительную [61]. Эти критерии (сероводород, металлы с различной валентностью и др.) часто являются продуктами жизнедеятельности бактерий. Влияние биохимических факторов на геохимические процессы в зоне гипергенеза подчеркивается и в работах А. И. Перельмана [1968 г.].

Гидробиохимическая зональность тесно связана с закономерностями распространения и формирования подземных вод. Особенно большое влияние на развитие бактерий в подземной гидросфере оказывают гидродинамический и геотермический режимы соответствующих участков земной коры, обусловленные степенью изоляции водоносных горизонтов от дневной поверхности, а также вещественный состав пород.

Как было указано (см. гл. III), согласно представлениям И. К. Зайцева [41], на территории СССР в вертикальном разрезе артезианских бассейнов существуют два гидродинамических этажа: верхний, объединяющий зону свободного и затрудненного водообмена, где распространены преимущественно инфильтрационные воды, и нижний, характеризующий зону затрудненного водообмена с преимущественным развитием седиментогенных и метаморфогенных вод.

Аэробная гидробиохимическая зона (табл. 21) соответствует зоне свободного водообмена, а смешанная — зоне, переходной от свободного к затрудненному водообмену. Обе зоны расположены

в верхнем гидродинамическом этаже. В зоне свободного водообмена распространены в основном слабоминерализованные кислородно-азотные карбонатные кальциевые, чаще всего холодные воды, а в переходной — слабосоленые, разного химического состава, холодные и термальные.

Анаэробная гидробиохимическая зона соответствует зоне затрудненного водообмена, расположенной также в верхнем гидродинамическом этаже. Здесь распространены как инфильтрационные, так и седиментогенные воды, преимущественно сильноминерализованные, азотно-метановые, сульфатно-хлоридные и хлоридные натриевые, термальные.

Зона отсутствия бактерий располагается в нижнем гидродинамическом этаже, где водообмен весьма затруднен. Здесь развиты седиментогенные и метаморфогенные воды, характеризующиеся высокими температурами и минерализацией. В этой зоне воды хлоридные, разного катионного состава, метановые, углекисло-метановые и др.

Существующие в земной коре гидродинамические этажи и зоны не являются, по мнению И. К. Зайцева, статическими, не изменяющимися во времени, а наоборот, на протяжении геологической истории формирования артезианских бассейнов они меняют свое положение, мощность и термодинамические условия, что определяется в первую очередь направлением и амплитудой вертикальных тектонических движений (поднятия и опускания), в результате которых происходит перемещение зон и этажей. При перемещении гидродинамических этажей и зон перемещаются и гидробиохимические зоны.

Наряду с вертикальной гидробиохимической зональностью, обусловленной геологическими факторами, в земной коре может быть выделена и широтная гидробиохимическая поясность, связанная с географическими факторами. В пределах отдельных гидробиохимических зон и поясов могут существовать отдельные биохимические микрозоны, имеющие такое же геохимическое значение, как и вышеописанные гидробиохимические зоны.

Известно, что направленность окислительно-восстановительных процессов в подземной гидросфере может быть определена по состоянию $Eh-rH$. Микроорганизмы чутко реагируют на изменение $Eh-rH$ среды. И вместе с тем они сами в процессе жизнедеятельности способны создавать и изменять окислительно-восстановительный потенциал и концентрацию водородных ионов в среде своего существования.

На примере изучения морских осадков и морских и пресных вод Л. Баас Бекингом, И. Капланом и Д. Муром [64] выявлены пределы колебания $Eh-rH$ для условий существования различных видов и групп бактерий, имеющих геологическое значение. Наибольший интерес представляют данные о $Eh-rH$ для условий существования тионовых и сульфатовосстанавливающих бактерий, широко распространенных в подземных водах. Наши и других исследователей [37] данные о значениях $Eh-rH$ в подземных

водах согласуются с результатами вышеназванных авторов о Eh—pH для условий существования тионовых и сульфатовосстанавливающих бактерий в морских и пресных водах.

Сопоставляя условия Eh среды раздельного и совместного существования тионовых и сульфатовосстанавливающих бактерий в подземных водах, можно установить пределы окислительно-восстановительного потенциала в аэробной, смешанной и анаэробной гидробиохимических зонах (табл. 21). Так, в аэробной зоне, где присутствуют только аэробные виды тионовых бактерий, значения Eh подземных вод будут колебаться от +800 до +100, в смешанной, где тионовые и сульфатовосстанавливающие бактерии развиваются совместно, — от +100 до —200, в анаэробной, характеризующейся развитием только сульфатовосстанавливающих бактерий, — от —200 до —400 мВ.

Значения pH под влиянием микроорганизмов, обитающих в различных гидробиохимических зонах, также изменяются в разных направлениях. В аэробной зоне при наличии соответствующих источников энергии — доноров электронов (серы, сероводорода, сульфидов) — в результате жизнедеятельности кислотолюбивых и кислотоустойчивых тионовых бактерий pH подземных вод могут изменяться до весьма кислых значений. В анаэробной зоне величины pH отвечают обычно нейтральным и щелочным значениям, но в отдельных случаях, например при активном развитии водородпродуцирующих бактерий, воды могут оказаться кислыми.

Полученные нами данные показывают, что гидробиохимическая зональность в разных гидрогеологических структурах имеет как общие черты, так и различия. Общей характерной чертой горноскладчатых областей является развитие в их пределах только двух типов гидробиохимических зон: аэробной и смешанной (табл. 22).

Аэробная гидробиохимическая зона выявлена в пределах Западного Саяна и Западного Танну-Ола, на Дальнем Востоке (Приморье), в Забайкалье, на Алданском щите, на Среднем Урале и др. Она охватывает различные по возрасту породы, подземные воды которых имеют разную минерализацию (от 0,03 г/л на Алданском щите до 100 г/л на Среднем Урале в рудничных водах), pH от 1,88 до 8,4 и температуру от 1 до 77°C [17, 21, 48 и др.].

При более детальном исследовании микрофлоры подземных вод горноскладчатых областей выявлены некоторые особенности гидробиохимической зональности в региональном плане. В пределах первой, в целом аэробной, гидробиохимической зоны в Западном Саяне и в Западном Танну-Ола можно проследить две подзоны. Первая подзона мало населена микрофлорой. В ней обнаруживаются только аэробные бактерии (встречаемость 20 %), факультативных здесь нет. Во второй подзоне встречаемость аэробных бактерий увеличивается, достигая 34 %. Здесь появляются в значительных количествах и факультативные бактерии (34 %). В исследованных водах Приморья аэробная гидробиохимическая зона характеризуется невысоким содержанием аэробных

(22 %) и еще меньшим содержанием факультативных (11 %) бактерий. В Забайкалье (горноскладчатое обрамление юго-восточной части Сибирской платформы) распространенность аэробных и факультативных бактерий в аэробной зоне примерно одинаковая, достигает соответственно 45 и 42 %; заселенность вод бактериями в целом выше, чем в других районах. В природных водах Среднего Урала встречаемость аэробных и факультативных бактерий еще более высокая (аэробных 66, факультативных 60 %).

Смешанная гидробиохимическая зона в горноскладчатых областях установлена пока лишь в Центральном Казахстане, где исследовались воды главным образом палеозойских отложений до глубины 500 м. Минерализация вод здесь 0,1—5,9 г/л, рН = 4,0 ÷ > 8,4, температура от 8 до 12 °С.

В артезианских бассейнах установлены три гидробиохимические зоны: смешанная, анаэробная и отсутствия бактерий (табл. 22).

Смешанная зона выявлена нами в Ангаро-Ленском и южной части Якутского (Восточно-Сибирская артезианская область), в южной части Западно-Сибирского, в Волго-Камском, а также в ряде бассейнов Средней Азии (Бухаро-Каршинском, Бадхыз-Карабильском, Сурхандарьинском и др.). В указанных бассейнах смешанная зона расположена на разных глубинах: в Якутском на глубине до 300, а в Западно-Сибирском (южная часть) на глубине > 3000 м. Смешанная зона охватывает как слабо-, так и сильноминерализованные воды (2—150 г/л), температура которых колеблется от 0 до 65 °С и выше (табл. 22).

Анаэробная гидробиохимическая зона, как видно из табл. 22, характерна для нефтегазоносных бассейнов. Она выявлена нами в Волго-Камском бассейне на глубине 600—800 (минерализация вод до 162 г/л) и в Сурхандарьинском на глубине 1226—1428 м (минерализация вод до 119 г/л).

Зона отсутствия бактерий обнаружена в Ангаро-Ленском артезианском бассейне на глубине > 500 (минерализация воды 600 г/л) и в Волго-Камском на глубине > 1200 м (минерализация воды до 277 г/л).

Из приведенных данных видно, что наиболее широко в исследованных гидрогеологических структурах развита смешанная гидробиохимическая зона. Она развита как в горноскладчатых областях, так и артезианских бассейнах. В подземных водах артезианских бассейнов обнаружены различные вещества, являющиеся продуктами жизнедеятельности бактерий. Наиболее характерны N_2 , NH_4^+ , H_2S , CO_2 (табл. 22). Содержание N_2 и NH_4^+ в некоторых бассейнах (Волго-Камский) закономерно увеличивается при смене гидробиохимических зон (II → III → IV), при смене зон II → III увеличивается и содержание $CO_2 + H_2S$ (Волго-Камский, Сурхандарьинский бассейны).

Установленная закономерность свидетельствует о том, что биохимические процессы в глубоких водоносных горизонтах развиваются в сторону создания восстановительных сред. Таким образом, биохимическими процессами охвачены гидрогеологические

Гидробиохимическая зональность в горноскладча

Район исследования (число проб/ число микробиологических определений)	Возраст пород	Глубина залегания от поверхности, м	Горноскладча						
			Минерализация, г/л	pH	Температура, °C	Микроорганизмы (% встречаемости)			
			аэробные	факультативные	анаэробные	K			
Горноскладча									
Западный Саян и Западный Танну-Ола (44/264)	PZ	0,0 (источники)	0,1—0,2	6,4—7,3	1—8	20	0	0	∞
	MZ	0,0 (источники)	0,1—4,7	2,6—7,5	1—10	34	48	3	11,0
Забайкалье и Алданский щит (81/486)	Q — AR	0,0 (источники)	0,03—6,8	2—10	1—77	45	42	2	22,5
Дальний Восток (Приморье) (9/63)	J ₁ — K	0,0 (источники)	0,04—0,2	6,3—7,1	2—7	22	11	0	∞
Средний Урал (22/132)	PZ	200—400	0,5—100,0	1,88—7,8	5—18	66	60	4	16,5
Центральный Казахстан (245/1715)	PZ	До 500	0,1—5,9	4,0—8,4	8—12	50	75	68	0,7
Артезианские бас									
Восточно-Сибирская (46/296)	Є	До 200	0,2—35,0	6,8—7,8	0—8	53	56	48	1,1
	Є ₁	До 300	85—100	6,8—7,8	2—10	50	66	50	1,0
	Є ₁	До 300	100—150	6,8—7,8	6—8	7	15	17	0,4
Ангаро-Ленский (5/25)	Є ₁	До 500	300—600	6,8—7,8	40—50	0	0	0	—
Западно-Сибирский (84/685)	P, K ₂	До 100	0,5—10,0	6,8—7,8	1—10	77	85	77	1,0
	K, K ₂	500—1000	0,5—2,0	6,0—7,8	15—50	75	66	55	1,3
	K, J	1000—3000	До 30	—	30—60 в ряде случаев 70—95	71	97	82	0,9
Бухаро-Каршинский (51/510)	K	874—1153	2,6—3,7	6,1—8,0	37—57	70	79	54	1,30
	K ₁ , J	1302—1493	66—95	5,2—8,4	66,5 и выше	25	33	33	0,80
Бадхыз-Карабильский (40/280)	Q — N	6—124	1,0—8,5	7,7—7,2	20—46	63	52	62	1,00
	P, K ₁ , K ₂	248—1000	3,17—36	6,6—8,0		63	51	50	1,26
Сурхандарьинский (18/198)	P	1027—1190	48—63	6,9—7,2	43—47	49	61	100	0,50
	P	1226—1428	55—119	5,4—7,0	>40	0	33	83	0
Волго-Камский (35/210)	C ₂ , P ₂	120—400	0,4—47	6,9—7,9	11—25	50	100	40	1,25
	P ₁ , P ₂	600—800	79—162	6,1—8,2		0	0	71	0
	D ₁ , D ₂	>1200	226—277	3,9—5,3		0	0	0	0

тых областях и артезианских бассейнах

Район исследования (число проб/ число микробиологических определений)	Возраст пород	Глубина залегания от поверхности, м	Горноскладча						
			Минерализация, г/л	pH	Температура, °C	Микроорганизмы (% встречаемости)			
			аэробные	факультативные	анаэробные	K			
Горноскладча									
тые области									
Западный Саян и Западный Танну-Ола (44/264)	PZ	0,0 (источники)	0,1—0,2	6,4—7,3	1—8	20	0	0	∞
	MZ	0,0 (источники)	0,1—4,7	2,6—7,5	1—10	34	48	3	11,0
Забайкалье и Алданский щит (81/486)	Q — AR	0,0 (источники)	0,03—6,8	2—10	1—77	45	42	2	22,5
Дальний Восток (Приморье) (9/63)	J ₁ — K	0,0 (источники)	0,04—0,2	6,3—7,1	2—7	22	11	0	∞
Средний Урал (22/132)	PZ	200—400	0,5—100,0	1,88—7,8	5—18	66	60	4	16,5
Центральный Казахстан (245/1715)	PZ	До 500	0,1—5,9	4,0—8,4	8—12	50	75	68	0,7
Артезианские бас									
сейны и области									
Восточно-Сибирская (46/296)	Є	До 200	0,2—35,0	6,8—7,8	0—8	53	56	48	1,1
	Є ₁	До 300	85—100	6,8—7,8	2—10	50	66	50	1,0
	Є ₁	До 300	100—150	6,8—7,8	6—8	7	15	17	0,4
Ангаро-Ленский (5/25)	Є ₁	До 500	300—600	6,8—7,8	40—50	0	0	0	—
Западно-Сибирский (84/685)	P, K ₂	До 100	0,5—10,0	6,8—7,8	1—10	77	85	77	1,0
	K, K ₂	500—1000	0,5—2,0	6,0—7,8	15—50	75	66	55	1,3
	K, J	1000—3000	До 30	—	30—60 в ряде случаев 70—95	71	97	82	0,9
Бухаро-Каршинский (51/510)	K	874—1153	2,6—3,7	6,1—8,0	37—57	70	79	54	1,30
	K ₁ , J	1302—1493	66—95	5,2—8,4	66,5 и выше	25	33	33	0,80
Бадхыз-Карабильский (40/280)	Q — N	6—124	1,0—8,5	7,7—7,2	20—46	63	52	62	1,00
	P, K ₁ , K ₂	248—1000	3,17—36	6,6—8,0		63	51	50	1,26
Сурхандарьинский (18/198)	P	1027—1190	48—63	6,9—7,2	43—47	49	61	100	0,50
	P	1226—1428	55—119	5,4—7,0	>40	0	33	83	0
Волго-Камский (35/210)	C ₂ , P ₂	120—400	0,4—47	6,9—7,9	11—25	50	100	40	1,25
	P ₁ , P ₂	600—800	79—162	6,1—8,2		0	0	71	0
	D ₁ , D ₂	>1200	226—277	3,9—5,3		0	0	0	0

Район исследования (число проб/число микробиологических определений)	Продукты жизнедея		
	Биогенный N ₂ , об. %	CO ₂ , об. %	H ₂ S, об. %
Горноскладча			
Западный Саян и Западный Тунн-Ола (44/264)	0	0	0
	0	0	0
Забайкалье и Алданский щит (81/486)	0	—	0—сл.
Дальний Восток (Приморье) (9/63)	—	—	0
Средний Урал (22/132)	—	—	0
Центральный Казахстан (245/1715)	0—33	5—39	—
Артезианские бас			
Восточно-Сибирская (46/296)	0 } 0 } 0 }	4—10	— — —
Ангаро-Ленский (5/25)	—	До 1—2 г/кг (растворенный газ)	—
Западно-Сибирский (84/685)	— — —	0,3—3,5 0,0—1,0 1,0—6,2	0 0 0
Бухаро-Каршинский (51/510)	—	0—19,4	—
Бадхыз-Карабильский (40/280)	— —	0,15—14,1 0,5—62,8	—
Сурхандарьинский (18/198)	— —	— 17—30	—
Волго-Камский (35/210)	0—65 59—88 76—93	1—25 1—26 0,2—5,2	0—10 2,6—35 0

тльности микроорганизмов				Гидробиох-мические зоны	Подзоны
SO ₄ ²⁻ , мг/л	HCO ₃ ⁻ , мг/л	NH ₄ ⁺ , мг/л	NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , мг/л		
тые области					
0—14	15—450	0—0,8	0	I	1
0—20	До 500	0—42	0—10	I	2
0—2753	0—11 627	0—3	0—1	I	Не расчле-нялись
До 250	До 50	0	—	I	То же
До 33 910	—	0	0	I	"
0—2544	48—3373	0,4—6,0	0,1—0,6	II	"
сейны и области					
0,005 5 — —	— — — —	— — — —	— — — —	II II II IV	1 2 3 —
99—233 0—49 0—87	268—622 До 915 До 2130	0—3 3—45 10—75	0—0,15	II II II	1 2 3
40—2550 420—3200	0—370 20—520	100—1000 0—210 000	— —	II II	1 2
270—2900 35—4340	104—153 30—1128	0 0,1—80	6,9—100 0—34	II II	1 2
930—7030 980—1920	140—1490 268—1950	— —	— —	II III	Не расчле-нялись То же
0—700 2000—9700 9—60	— — —	0—10 3,2—34 207—400	— — —	II III IV	" " "

структуры всех основных типов, как массивы трещинно-жильных вод, так и артезианские бассейны. Направленность окислительно-восстановительных процессов в указанных структурах может быть определена с помощью коэффициента K , который изменяется в широких пределах: от нуля в условиях сильновосстановительной среды до ∞ в сильноокислительной. Коэффициент $K = 0$ свойствен только артезианским бассейнам (табл. 22). В горноскладчатых областях его значение зависит, как видно из табл. 22, от рельефа и климата. В высокогорных и среднегорных гумидных районах, где развита аэробная зона, он стремится к бесконечности, в низкогорных аридных и зеленых гумидных, где выявляется смешанная зона, снижается до 0,73.

Поскольку коэффициент K свидетельствует об интенсивности водообмена и указывает на направленность протекающих в системе порода—вода биогеохимических процессов, можно утверждать, что в условиях высоко- и среднегорного рельефа и влажного климата протекают главным образом окислительные биогеохимические процессы, в то время как в условиях низкогорного рельефа и аридного климата — и восстановительные. С помощью коэффициента K в пределах различных гидробиохимических зон могут быть выделены подзоны, которые с большей точностью отражают направленность рассматриваемых процессов в исследуемых водоносных комплексах.

Таким образом, гидробиохимическая зональность является индикатором направленности окислительно-восстановительных биогеохимических процессов, протекающих в системе вода — порода. Ее выявление и изучение могут быть использованы для: 1) выяснения и уточнения положения кислородных границ в различных гидрогеологических структурах как в региональном плане, так и в пределах отдельных водоносных комплексов; 2) определения степени изоляции водоносных комплексов от дневной поверхности; 3) установления характера физико-химического состояния исследуемых систем.

Выявление и анализ гидробиохимической зональности важны для изучения процессов и условий формирования, сохранения и разрушения месторождений полезных ископаемых. Для сохранения месторождений наиболее благоприятна зона отсутствия бактерий, где современные биогеохимические процессы не протекают.

Смешанная гидробиохимическая зона благоприятна для образования месторождений серы [9, 18, Беленицкая Г. А., 1972 г.]. Здесь при определенных условиях могут быть образованы и сульфиды, хотя для них, как показывают наши исследования, наиболее благоприятна анаэробная гидробиохимическая зона [4, 26]. Образование бокситов связано как с аэробной, так и анаэробной гидробиохимическими зонами [34].

Разрушение месторождений чаще всего связано с аэробной гидробиохимической зоной, хотя эта зона может быть благоприятной и для формирования некоторых месторождений, например

железомарганцевых руд, формирующихся в открытых водоемах [Перфильев Б. В., Габе Д. Р., 1964 г.].

Выявление и анализ гидробиохимической зональности также важны при изучении условий миграции в подземных водах химических элементов (халькофильных, сидерофильных и др.) с переменной валентностью в связи с разработкой гидрогеохимических критериев поисков различных руд.

В аэробной зоне развиваются микроорганизмы, участвующие в образовании кор выветривания, к которым приурочены многие месторождения никеля, хрома и др. Н. Н. Медведева придает большое значение кислотообразующим автотрофам в образовании кор выветривания, особенно нитрификаторам. Последние повсеместно распространены в корах выветривания. Согласно результатам лабораторных опытов нитрифицирующие бактерии переводят в раствор магний, кальций, кремний, но не растворяют силикаты никеля. Таким образом, они способствуют растворению более подвижных элементов и концентрации менее подвижных [Медведева Н. Н., 1980 г.].

Ниже в качестве примера рассмотрена гидробиохимическая зональность в Чу-Сарысуйском артезианском бассейне.

Микробиологические исследования подземных вод Чу-Сарысуйского артезианского бассейна проводились в комплексе с гидрогеологическими и гидрогеохимическими. Они выполнялись совместно с Г. М. Шором и В. М. Тарасовым.

Чу-Сарысуйская впадина, ограниченная горными сооружениями хр. Каратау на юго-западе, Киргизского хребта на юге, горами Кендыктас и Чу-Илийскими на востоке и хр. Улуту на севере и северо-западе, в гидрогеологическом отношении представляет обширный межгорный артезианский бассейн. Во впадине выделяются два структурных этажа: фундамент, сложенный консолидированными породами, и осадочный чехол, имеющий двухъярусное строение [56].

Почти повсеместно палеозойские породы перекрыты отложениями типично платформенного мезозойско-кайнозойского чехла, представленными континентальными и морскими образованиями (пески, песчаники, глины, мергели, алевролиты) позднемелового, палеогенового, неогенового и четвертичного возраста [56]. В гидрогеологическом отношении осадочные образования мезозойско-кайнозойского возраста наиболее изучены. В морских и континентальных терригенных отложениях мезозойско-кайнозойского возраста выделяются два водоносных комплекса: палеоген-верхнемеловой и неоген-четвертичный, разделенные регионально распространенными водоупорами. Микробиологическими исследованиями были охвачены подземные воды палеоген-верхнемеловых отложений.

Палеоген-верхнемеловые континентальные образования с заключенными в них подземными водами представляют единый водоносный комплекс, для которого характерны напорные воды с минерализацией 0,3—3 г/л. По химическому составу они гидрокарбонатные магниево-кальциевые, гидрокарбонатно-сульфатные и сульфатно-хлоридные натриевые. Водоносный комплекс палеоген-верхнемеловых отложений залегает в низах мезозойско-кайнозойской осадочной толщи на глубинах до 800 м. Напорные воды, приуроченные к регионально распространенным в Западно-Чуйском артезианском бассейне палеоген-верхнемеловым отложениям, вскрываются многочисленными скважинами, большей частью самоизливающимися, как правило, высокодебитными (3—5, реже до 40 л/с). Основной область питания палеоген-верхнемелового водоносного комплекса является хр. Каратау, областями разгрузки — долина р. Чу, а также район пересыхающих озер Ащиколь, Акжайкын и др. Для подземных вод комплекса характерна довольно интенсивная динамика, особенно вблизи горных сооружений Киргизского хребта и хр. Каратау. В подземных водах палеоген-верхнемелового комплекса Чу-Сарысуйской впадины выявлялись и изучались аэроб-

ные (типа *T. thiooxidans* и *T. trautweinii*) и анаэробные (сульфатовосстанавливающие и водородпродуцирующие) бактерии. Исследования показали, что названные бактерии закономерно (зонально) распределяются в пределах данного водоносного комплекса. По отдельному и совместному развитию аэробной и анаэробной микрофлоры в водах выделяются три гидробиохимические зоны: аэробная, смешанная (аэробно-анаэробная) и анаэробная (табл. 23, рис. 3).

В аэробной гидробиохимической зоне развиты только тионовые бактерии типа *T. thiooxidans* и *T. trautweinii*, в смешанной наряду с названными развиваются сульфатовосстанавливающие бактерии. На некоторых участках смешанной зоны присутствуют также водородпродуцирующие бактерии. Для анаэробной зоны характерны только сульфатовосстанавливающие бактерии.

Таблица 23

Характеристика активности бактерий в гидробиохимических зонах
Чу-Сарыуской артезианской бассейна (примеры)

Номер водоисточника	Аэробная зона		Номер водоисточника	Смешанная (аэробно-анаэробная) зона			Номер водоисточника	Анаэробная зона, сульфатовосстанавливающие бактерии
	<i>T. thiooxidans</i> (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, %)	<i>T. trautweinii</i> (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, %)		<i>T. thiooxidans</i> (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, %)	Сульфатовосстанавливающие бактерии	Водородпродуцирующие бактерии		
1	100	0	10-оп	100	+++	0	5	+++
14	100	0	17-г	100	+++	+++	63	++
167	100	0	82	100	+++	+++	104	+++
20	0	100	88-оп	100	+++	0	172	++
26	0	100	91-оп	100	+++	+++	601	+++
83—84	0	100	92-оп	100	+++	0		+++

В палеоген-верхнемеловом комплексе Чу-Сарыуской впадины наиболее широко распространена аэробная гидробиохимическая зона, охватывающая всю восточную и центральную части бассейна и территорию северо-восточнее оз. Арыс. Смешанная гидробиохимическая зона занимает значительные площади на северо-востоке и в западной части бассейна, а также в бассейне оз. Арыс. Локально она проявляется в центральной части бассейна. Анаэробная гидробиохимическая зона обнаруживается локально, на фоне смешанной зоны, а также к югу от оз. Арыс.

Окислительные биохимические процессы в аэробной гидробиохимической зоне протекают с разной интенсивностью. Наиболее интенсивны они на участках активного развития микроорганизма *T. thiooxidans*. На участках, где отмечаются только *T. trautweinii*, окислительные биохимические процессы протекают со средней интенсивностью. В отдельных случаях интенсивные биохимические процессы проявляются и в смешанной гидробиохимической зоне.

В смешанной гидробиохимической зоне интенсивные разнонаправленные окислительно-восстановительные процессы протекают на участках, где совместно активно развиваются тионовые и сульфатовосстанавливающие бактерии.

В анаэробной гидробиохимической зоне восстановительные биохимические процессы интенсивно протекают при активном развитии сульфатовосстанавливаю-

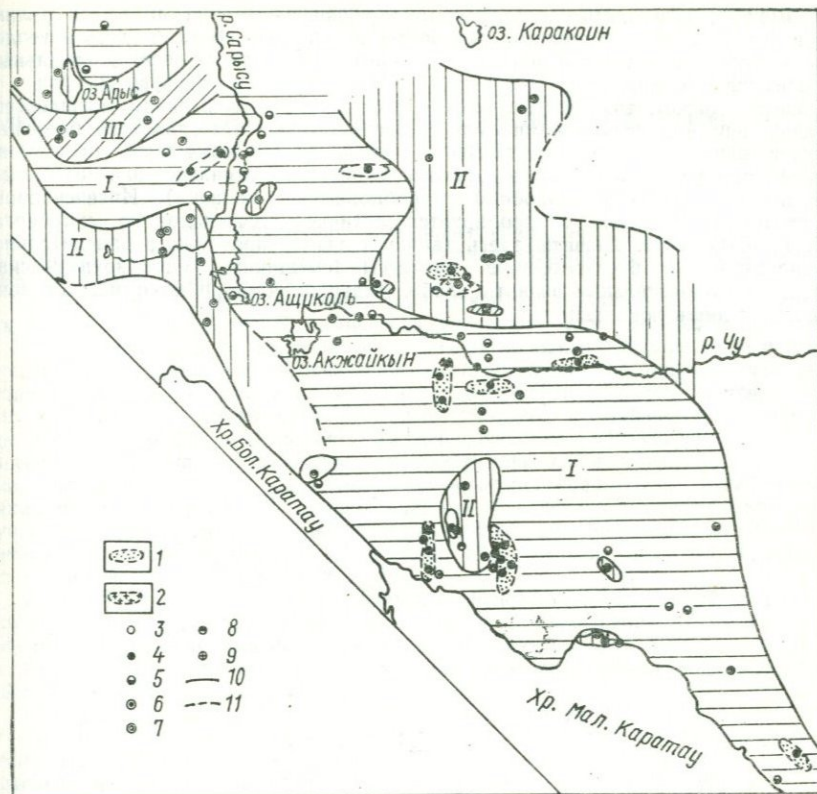


Рис. 3. Схема гидробиохимической зональности водоносного комплекса палеоген-верхнемеловых отложений Чу-Сарысу́йской впадины.

1—2 — участки активного развития отдельных видов бактерий: 1 — *Thiobacillus thiooxidans*, 2 — сульфатвосстанавливающих; 3 — скважина; 4—9 — биогенные окислительно-восстановительные реакции: 4 — интенсивные окислительные под влиянием *T. thiooxidans*, 5 — средние окислительные под влиянием *T. trautweinii*, 6 — слабые окислительные, 7 — интенсивные окислительно-восстановительные при совместной деятельности тионовых и сульфатвосстанавливающих бактерий, 8 — то же, при совместной деятельности тионовых, сульфатвосстанавливающих и водородпродуцирующих бактерий, 9 — интенсивные восстановительные под влиянием сульфатвосстанавливающих бактерий; 10—11 — границы гидробиохимических зон: 10 — установленные, 11 — предполагаемые;

I—III — гидробиохимические зоны: I — аэробная, II — смешанная, III — анаэробная.

щих бактерий. Их активная геохимическая деятельность в этой зоне приводит к накоплению в водах сероводорода.

В смешанной зоне даже при активном развитии сульфатвосстанавливающих бактерий накопления сероводорода в водах не происходит, что может быть объяснено разными причинами: отсутствием достаточного количества источников энергии (органического вещества и сульфатов), необходимых для развития биогенной сульфатредукции, связыванием образующегося сероводорода железом, а главное, как нам кажется, деятельностью обитающих в этой зоне тионовых бактерий, под влиянием которых сероводород непрерывно окисляется. На некоторых участках смешанной зоны обнаружены водородпродуцирующие бактерии. Напомним, что эти бактерии не требуют для своего развития ни свободного, ни связанного кислорода, так как получают энергию для своей жизнедеятельности в процессе брожения органического вещества, которое протекает при полном отсутствии кислорода.

Возможно, выявленные водородпродуцирующие бактерии являются реликтовыми формами, т. е. потомками тех бактерий, которые обитали здесь в геологическом прошлом и участвовали в ранее протекавших здесь восстановительных биогеохимических процессах.

Таким образом, гидробиохимическая зональность, выявленная в палеоген-верхнемеловом водоносном комплексе Чу-Сарьсуйского артезианского бассейна, отражает направленность протекающих здесь биогеохимических процессов. Наиболее широко развиты в исследованном водоносном комплексе окислительные биохимические процессы (аэробная гидробиохимическая зона). Интенсивность окислительных процессов контролируется активной деятельностью микроорганизма *T. thiooxidans*. Развиты здесь также и разнонаправленные окислительно-восстановительные биохимические процессы (смешанная гидробиохимическая зона), а восстановительные развиты слабо. Анаэробная гидробиохимическая зона проявляется лишь локально.

РОЛЬ МИКРООРГАНИЗМОВ В ПРОЦЕССАХ ВОДНОЙ МИГРАЦИИ И АККУМУЛЯЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Среди различных факторов, обуславливающих миграцию и аккумуляцию химических элементов в системе вода—горная порода, деятельность микроорганизмов играет важную роль.

Впервые роль и значение биогенного фактора (живого вещества) в процессах миграции и аккумуляции химических элементов были изучены и обоснованы В. И. Вернадским. В. И. Вернадский дал геохимическое представление о живом веществе и создал теоретические основы биогеохимии. Он показал, что живое вещество, в том числе и микроорганизмы, характеризующиеся массой, химическим составом и геохимической энергией, обладает способностью перемещать химические элементы в биосфере. Выделяя различные биохимические функции биосферы (газовую, кислородную, окислительную, кальциевую, восстановительную, концентрационную, разрушения органических соединений, метаболизма и дыхания), В. И. Вернадский подчеркивал, что «все без исключения биохимические функции живого вещества в биосфере могут быть исполнены простейшими одноклеточными организмами» [5, с. 288—290]. «Чем меньше организм, тем больше его геохимическая энергия...» [5, с. 261].

В. И. Вернадский придавал большое значение созидательной и разрушительной работе микроорганизмов. Так, говоря о разрушении таких труднорастворимых соединений, как силикаты и алюмосиликаты, В. И. Вернадский [1954 г.] подчеркивал, что хотя основным фактором этого разрушения и является вода, действие чистой воды очень слабо.

«Природная вода всегда содержит в растворе кислород, угольную кислоту — продукты жизни; в ней находятся, кроме того, органические вещества биохимического происхождения и, наконец, организмы. В этих сложных условиях силикаты и алюмосиликаты разлагаются» [В. И. Вернадский, 1954 г., с. 140].

В настоящее время известно существование «силикатных» бактерий, которые, разрушая алюмосиликаты, освобождают калий и другие зольные элементы в растворимой форме. К числу таких бактерий относятся *Bac. mucilaginosus*, *Bac. oligonitrophilus*, *Bac. mesentericus* и др. [Александров В. Г., Терновская М. Я., 1963 г.].

В результате развития геологической микробиологии накопился довольно большой фактический материал, характеризующий геохимическую деятельность микроорганизмов в различных экологических системах (почвах, иловых отложениях, породах, водах). Выделены и изучены микроорганизмы, участвующие в образовании подвижных форм железа и марганца, геохимическая деятельность которых приводит к формированию железомарганцевых озерных руд. Эти микроорганизмы относятся к разным систематическим группам. Их морфологическая и биогеохимическая характеристика рассмотрена в работах Б. В. Перфильева, Д. В. Габе [1964 г.], С. И. Кузнецова [36], Г. А. Заварзина [13], В. М. Горленко, Г. А. Дубининой, С. И. Кузнецова [1977 г.].

С помощью капиллярного метода, разработанного и примененного Б. В. Перфильевым и Л. Г. Габе [1964 г.], удалось наблюдать процесс накопления железа и марганца в условиях, близких к природным. Исследования показали существование двух физиологических групп микроорганизмов-концентраторов. К первой группе относятся микроорганизмы, окисляющие преимущественно марганец (*Metallogenium*, *Gaullococcus*, *Kusnezovia* и др.), ко второй — окисляющие в илу только железо (*Siderococcus*, *Gallionella*, *Ochrobium* и др.).

Изучение микробного пейзажа с помощью капиллярного телескопа и применение этого метода к донным осадкам рудоносных озер в условиях формирования вторичного микроразонального диагенетического профиля позволили авторам убедительно доказать, что в окислении марганца и железа, и особенно в концентрировании их в донных осадках, т. е. на начальном этапе осадочного

рудотолжения, в стадии диагенеза, специфические микроорганизмы играют ведущую роль.

Согласно данным Д. Р. Габе, Э. П. Трошанова и Э. Э. Шерман [1964 г.], обогащение осадка марганцем в микронеоне развития *Metallogenium* происходит за счет растворения и восстановления окисных соединений марганца нижнего горизонта илового профиля и использования двухвалентной формы в качестве энергетического материала марганецоксилюющим микроорганизмом.

Концентрирование в илу железа в виде желто-оранжевой прослойки протекает в микронеоне развития *Siderococcus* или в присутствии аналогичных железоксилюющих микробов. Вследствие этого загадочное для геологов явление раздельного отложения марганца и железа находит свое отражение, как утверждает Б. В. Перфильев, в тонкоярусном распределении микробов, окисляющих марганец и железо.

Условия для жизнедеятельности микроорганизмов, окисляющих марганец и железо в иловом профиле, на границе между окислительной и восстановительной зонами остаются благоприятными в течение длительного времени, поскольку снизу непрерывно поступают восстановленные ионы железа и марганца (восстановление их осуществляется редуцирующей микрофлорой *Bac. circulans*, *Bac. polymyxa* и др.), а сверху из придонной воды проникает растворенный кислород, способствующий развитию микробов-окислителей.

Хотя указанные условия также благоприятны для окисления марганца и железа путем аутооксидации с постепенным их накоплением в осадке, одного этого механизма, как подчеркивает Б. В. Перфильев, недостаточно, чтобы обеспечить концентрирование железа и марганца в данных осадках на ранней стадии диагенеза как в виде слоистых образований, так и в форме конкреций. Учитывая тот факт, что на построение одной весовой единицы живого вещества железобактерии расходуют энергию, освобождающуюся при окислении сотен весовых единиц железа, следует признать, что только в условиях размножения микроорганизмов, окисляющих Mn^{2+} и Fe^{2+} , при непрерывном поступлении этих источников энергии можно ожидать накопления огромных отходов в виде окислов марганца и железа в данных осадках [Перфильев Б. В., Габе Д. Р., 1964 г.]. Микроорганизмы, окисляющие железо и марганец, обнаружены в минеральных и термальных источниках [Eleftheriadis D., Wenzel A., 1976 г.]. Существуют бактерии, под влиянием которых происходит растворение неорганических фосфатов [Илялетдинов А. Н., 1966; Herrison M. J., 1972 г.]. Известны микроорганизмы (автотрофы и гетеротрофы), принимающие участие в растворении золота [Парес И., 1968 г.; Ляликова Н. Н., Мокенчева Л. Я., 1969 г.; Коробушкина Е. Д., Черняк А. С., Минеев Г. Г. и др. 1976 г.]. Хорошо изучена геохимическая деятельность тионовых бактерий (*T. ferrooxidans* и др.) в окислении сульфидных минералов [Кузнецов С. И., Иванов М. В., Ляликова Н. Н., 1962 г.; Ляликова Н. Н., 1968 г.]. Показана роль нитрификаторов в разрушении минералов и создании кор выветривания. Нитрифицирующие бактерии, распространенные в корях выветривания, образующихся на серпентинизированных ультрабазитах, переводят в раствор магний, кальций, кремний, но не растворяют силикаты никеля. Это способствует переходу в водный раствор более подвижных элементов и концентрации в породах менее подвижных [Медведева Н. Н., 1980 г.].

Механизм разрушения горных пород и рудных минералов микроорганизмами различен. В одних случаях это происходит благодаря способности микроорганизмов (автотрофных) использовать энергию окисления элемента для их автотрофного роста. Известно, что при окислении ряда восстановленных соединений элементов с переменной валентностью выделяется свободная энергия, которая используется микроорганизмами для усвоения свободной углекислоты. Такой способностью обладают некоторые виды тионовых бактерий, в частности вид *T. ferrooxidans*, использующий энергию окисления сульфидных минералов, закисного железа и серы, и *T. thiooxidans*, живущий за счет энергии окисления серы. Н. Н. Ляликова выделила новый автотрофный микроорганизм *Stibiobacter senarmontii*, который получает энергию от окисления сурьмы. В природе этот организм, по данным Н. Н. Ляликовой, окисляет трехокись сурьмы в виде минерала сенармонита [Медведева Н. Н., 1980 г.]. Термодинамические расчеты показали, что при окислении трехвалентной сурьмы по реакции $2Sb_2O_3 + O_2 = 2Sb_2O_4$ выделяется 73,3 ккал.

В других случаях рудные минералы разрушаются под воздействием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, образующихся как при автотрофном, так и гетеротрофном образе жизни. При автотрофном образе жизни, каким характеризуется, например, *T. ferrooxidans*, большое влияние на рудные минералы оказывает образующее этим микроорганизмом сернокислородное окисное железо, являющееся активным химическим окислителем.

При гетеротрофном образе жизни продуктами жизнедеятельности могут быть различные органические кислоты: угольная, уксусная, лимонная и др. Так, в опытах М. Дж. Херрисона и др. [Harrison M. J. e. a., 1972 г.] процесс разложения неорганических фосфатов происходил под влиянием молочной, гликолевой, глюконовой и уксусной кислот, которые были образованы бактериями, выделенными из донных отложений оз. Верхнее Клатат на среде с глюкозой. Молочная, пировиноградная и лимонная кислоты обнаружены в воде, а молочная, гликолевая и глюконовая — в образцах донных отложений. При бактериальном расщеплении неорганические фосфаты располагались в следующем порядке: $\text{CaHPO}_4 \rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \rightarrow \text{FePO}_4 \rightarrow \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \rightarrow \text{Al}_3(\text{PO}_4)_2$.

В результате изучения биохимического состава продуктов метаболизма золоторастворяющих штаммов бактерий Е. Д. Коробушкина и др. [1976 г.] установили, что растворителями золота из числа испытанных аминокислот являются гистидин, серин, глицин, треонин, аспарагиновая кислота.

В литературе известны данные о том, что органические вещества, выделяемые микроорганизмами, способны образовывать внутрикомплексные соединения хелатного типа с освобождающимися при разрушении минералов элементами. В комплексах этого типа ионы металлов связаны с органическими радикалами в форме циклических соединений, весьма устойчивых в широких диапазонах рН, Eh и других физико-химических условий среды. В результате хелатизации многие минералы способны растворяться и в дальнейшем извлекаться из породы, постепенно ее разрушая [Аристовская Т. В., Дарагин А. Ю., Зверева Т. С., 1972 г.; Сушкина Н. Н., Цюрупа И. Г., 1973 г.].

Гетеротрофные бактерии широко распространены в подземных водах. Число их, по нашим данным и данным других исследователей, достигает нескольких миллионов клеток в 1 мл воды. Среди них выделяются виды, относящиеся к родам *Bacillus*, *Bacterium*, *Chromobacterium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas* и др. Выделенные нами из подземных вод и пород бактерии из рода *Clostridium* стимулировали вынос из пород калия, железа (Fe_2O_3), кремния (SiO_2). Эти микроорганизмы, как будет показано в дальнейшем, играют важную роль в образовании бокситовых руд.

Участие микроорганизмов в расщеплении различных соединений металлов связано также с потребностью бактерий в самих элементах (металлах). Известно, что такие металлы, как кобальт, молибден, никель, медь, железо и др., играют важную роль в жизни бактерий. Часть из них входит в состав витаминов и ферментов, без участия которых невозможен обмен веществ в живой клетке. Эти элементы, поступая в клетку, образуют с ее белковым веществом устойчивые соединения и высвобождаются из них только после отмирания бактерий.

Накопление микроэлементов микроорганизмами может быть приспособительной реакцией на геохимические условия среды. У представителей отдельных систематических групп обнаружены молибден, медь, никель, кобальт, цинк, ртуть, марганец, железо, сера, свинец, иод, серебро, селен, стронций, алюминий, кальций. Поглощенные элементы локализуются на клеточной стенке в цитоплазматической мембране, ядре, вакуолях. Некоторые микроорганизмы могут аккумулировать микроэлементы в количествах, в сотни раз превышающих их содержание в среде [39, 71].

Металлы в биологических системах принимают участие в многочисленных реакциях разного рода. Эти реакции, изменяющие валентность металла, стимулируют образование комплексных и хелатных соединений ионов с органическими лигандами и др. [71].

Перечисленные данные свидетельствуют о тесной связи микроорганизмов с геохимическими факторами среды. На основе этой связи возникло новое направление в экологии и биогеохимии — геохимическая экология микроорганизмов. Результаты многолетних исследований С. В. Летуновой [39] по геохимической экологии микроорганизмов, обитающих в почвах и иловых отложениях

различных биогеохимических провинций, обогащенных молибденом, медью, ванадием, цинком, селеном, показали, что все эти элементы вовлекаются биомассой почвенной микрофлоры в биогенную миграцию. Установлена адаптация микроорганизмов к химическому составу среды. Адаптивные реакции установлены для разных сторон жизнедеятельности микроорганизмов: роста, накопления ими микроэлементов, некоторых обменных процессов, специфически зависящих от различных элементов (кобальта, молибдена, ванадия, меди, селена, бора) [39].

Для характеристики механизма бактериального разрушения пород и рудных минералов большой интерес представляют исследования Д. Т. Звягинцева [16] о взаимодействии микроорганизмов с твердыми поверхностями. Д. В. Звягинцев, используя люминисцентный микроскоп, показал, что большинство водных и почвенных микроорганизмов адсорбировано на поверхности твердых агрегатов. При прямом микроскопическом наблюдении за растворением кристаллов установлено, что в тех местах, где расположены клетки, начинается быстрое растворение кристаллов. Уже через 20—40 мин кристалл становится сильно изъеденным и через некоторое время переламаывается в том месте, где была расположена клетка.

Предполагается, что «твердая поверхность может оказывать благоприятное действие, препятствуя рассеванию экзоферментов и продуктов гидролиза органического вещества, которые концентрируются на поверхности вблизи адсорбированных клеток и оказываются более доступными для них, чем для свободных клеток» [16, с. 135].

Значение твердых поверхностей для активной геохимической деятельности микроорганизмов подтверждается данными и других исследователей. Так, В. Мейер и др. [Meuер W. e. a., 1976 г.] при исследовании процесса выщелачивания горючих сланцев под влиянием тионовых и сульфатостанавливающих бактерий с помощью сканирующего микроскопа наблюдали образование каверн и полостей в структуре сланцев, которые росли в размере по ходу выщелачивания. С помощью сканирующего микроскопа Дж. Беннет и Х. Трибуч [Ben-nett J. C., Tributsch H., 1978 г.] исследовали кристаллы пирита FeS_2 , подвергавшегося воздействию *T. ferrooxidans*. На поверхности кристаллов обнаружены следы бактериального выщелачивания в виде ямок и выщерблин разных размеров. В некоторых углублениях находились клетки бактерий, что подтвердило их прежние наблюдения о том, что процесс бактериального выщелачивания происходит главным образом на месте контакта бактериальных клеток с поверхностью кристалла пирита. Р. С. Головачева [1979 г.] показала, что прикрепление отдельных бактерий (*Sulfobacillus thermosulfidooxidans*) к поверхности минерала происходит при помощи обильного слизиобразования.

Некоторые исследователи полагают, что механизм прикрепления клеток к поверхности минералов носит характер избирательной адсорбции. Это показали опыты с образцами бедной руды, содержащей пирит и халькопирит, которые подвергались бактериальному выщелачиванию. На снимках, полученных в сканирующем электронном микроскопе, бактериальные клетки адсорбированы на поверхности сульфидных минералов, но не на поверхности силикатов, которыми были представлены вмещающие породы [66].

В свете вышесказанного о механизме бактериального разрушения горных пород и рудных минералов становятся вполне убедительными данные П. А. Удодова и сотрудников относительно высокой геохимической активности микроорганизмов, выделенных из связанной воды горных пород методом отпрессовывания под большим давлением [20]. В поровых растворах микрофлора, очевидно, находится в более тесном контакте с рудными минералами, чем в свободных водах. Она представлена гетеротрофными (споровыми и неспоровыми) бактериями, растущими на МПА, актиноциетами, нитрифицирующими I и II фаз, денитрифицирующими, тионовыми. Бактерии *T. ferrooxidans*, выделенные из поровых растворов нижних горизонтов коры выветривания палеозойских пород, ускоряли процесс выщелачивания сульфидов в 20—30 раз по сравнению с химическим окислением [20].

В процессах миграции и аккумуляции халькофильных элементов важную роль играют две группы микроорганизмов: тионовые и сульфатостанавливающие. Эти микроорганизмы широко распространены в подземных водах. Они выполняют разнонаправленную геохимическую функцию по отношению к рудному сульфидному веществу. Первые, обитающие в аэробной и смешанной гид-

робиохимической зонах, окисляют сульфиды и способствуют образованию и миграции воднорастворимых форм халькофильных элементов (Ag, Cd, Co, Cu, Mo, Ni, Zn и др.). Вторые, свойственные смешанной и анаэробной гидробиохимическим зонам, наоборот, осаждают названные элементы продуктами своей жизнедеятельности, обуславливая их аккумуляцию в гипергенных образованиях [26, 27, 29].

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ТИОНОВЫХ БАКТЕРИЙ КАК ФАКТОР МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Геохимическая деятельность тионовых бактерий, в частности *T. ferrooxidans*, в условиях эксперимента изучалась многими исследователями. Экспериментально доказано, что *T. ferrooxidans* окисляет практически все известные сульфидные минералы. К их числу относятся такие широко распространенные в природе минералы, как пирит и марказит FeS_2 , халькопирит Cu_2S , кобальтин CoAsS , арсенопирит FeAsS , молибденит MoS_2 , сфалерит ZnS , галенит PbS , антимонит Sb_2S_3 и др. [Ляликова Н. Н., 1968 г.].

Скорость бактериального окисления сульфидов значительно превышает скорость их химического окисления. Так, в опытах Л. Брайнера и др. [68] скорость окисления пирита по сравнению со стерильным раствором возрастала в 20 раз. По данным японских исследователей, скорость окисления пирита под действием микроорганизмов примерно в 1000 раз превышала скорость чисто химического окисления [19].

Н. Н. Ляликова [42, 1966 г.] установила, что железа из колчеданной руды в присутствии *T. ferrooxidans* в раствор переходит в 200, а меди в 8 раз больше, чем в опытах, когда влияние бактерий устраняется стерилизацией. Извлечение в раствор кобальта из кобальтина с помощью *T. ferrooxidans* увеличилось в 75 раз по сравнению со стерильным раствором.

Кроме пирита и халькопирита в опытах с *T. ferrooxidans* окислялись сульфиды цинка, никеля, сурьмы, свинца, олова, молибдена, мышьяка [19, 67, Гольбрайт А. И., Илялетдинов А. Н., 1970 г.]. Вместе с тем Г. И. Каравайко, С. И. Кузнецов и А. И. Голомзик [19] подчеркивают, что хотя бактерии и окисляют сульфиды свинца, олова и молибдена, однако выщелачивание этих металлов (например, свинца) либо не происходит, либо идет очень слабо.

В связи с изучением процессов водной миграции халькофильных элементов нас также интересовал вопрос о влиянии бактерий на вынос из пород молибдена и свинца и переход их в подземные воды.

Для установления возможности биохимического окисления сульфидов молибдена, не содержащих растворимых его форм, в опытах были использованы природные молибдениты, полностью отмытые от растворимых форм молибдена и других металлов. Свободной серы эти молибдениты по данным химического анализа также не содержали.

Процесс окисления молибденитов, не содержащих растворимых форм молибдена, изучался под влиянием накопительных

культур тионовых бактерий, выделенных из подземных вод, рыхлых элювиально-делювиальных образований и молибденовых руд. Опыты проводились на минеральных средах при кислом и нейтральном значении рН в колбах без продувания воздуха; длительность опытов 2—3 мес. В результате установлено, что растворимые формы молибдена образуются под влиянием тионовых бактерий, развивающихся как в кислой, так и в слабощелочной среде. Количество растворенного молибдена определялось чаще всего десятими долями, а иногда единицами миллиграммов на литр. В контрольных колбах без бактерий образования растворимых форм молибдена не наблюдалось. Учитывая, что в природных водах некоторых молибденовых месторождений Казахстана содержание молибдена определяется единицами и десятками гамм в 1 л, количество молибдена, определяемое сотнями и тысячами гамм в 1 л в опытах с бактериями, является довольно значительным [25].

Влияние тионовых бактерий на вынос свинца из пород (природная руда, состоящая из галенита и церуссита) изучалось совместно с И. И. Призреновой и А. А. Нечаевой. Опыты проводили в специальных перколяторах, через которые пропускали под давлением стерильный воздух, в результате чего осуществлялась постоянная циркуляция растворов. В стерильные перколяторы помещали смесь стерильного кварцевого песка и измельченного галенита с церусситом по 5 г каждого. Растворами служили минеральные среды с кислыми и нейтральными значениями рН (4,4 и 7,0). Для опытов использовали биоценоз микроорганизмов, содержащийся в кислых рудничных водах и в нейтральных водах сульфидных месторождений. В контрольные перколяторы бактерии не вносили, но для создания одинаковых химических условий в них были внесены те же подземные воды, что и в опытные перколяторы, но освобожденные от микроорганизмов путем фильтрации этих вод через мембранные фильтры. Опыт длился 68 сут при 20—23 °С. По истечении этого срока во всех перколяторах определяли свинец, перешедший в раствор.

Результаты химического анализа показали, что в присутствии бактерий происходит накопление свинца в растворе как при кислых, так и при нейтральных значениях рН. Количество свинца, перешедшего в раствор в присутствии бактерий, составляло 0,7—3,884 мг/л. При отсутствии бактерий накопления в растворе свинца не наблюдалось. Для того чтобы выяснить, какой биоценоз бактерий принимал участие в окислении минералов, содержащих свинец, в конце опыта делались высевы из перколяторов на различные среды. В перколяторах с кислыми растворами обнаружены в активном состоянии *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans* и *T. trautweinii*, в перколяторах с нейтральными растворами — *T. thiooxidans*, *T. trautweinii* и *T. denitrificans*. Микроорганизм *T. ferrooxidans* или отсутствовал либо был малоактивен. В контрольных перколяторах микроорганизмы не обнаружены.

Полученные данные позволяют заключить, что биогенный

фактор играет заметную роль в образовании растворимых форм молибдена и свинца при окислении природных, содержащих молибден и свинец минералов.

Биохимическому воздействию подвергаются также редкие элементы, заключенные в сульфидных минералах, такие как германий, индий, галлий, кадмий, титан, висмут, таллий. Переход в раствор последнего из геохронита $Pb_5(SbAs_2)S_8$ в опытах Н. Н. Ляликовой и М. Ф. Куликовой [1965 г.] был в 2—5 раз быстрее, чем в контроле. По тем же данным скорость выщелачивания кадмия из сфалерита под влиянием *T. ferrooxidans* возрасла в 5—8 раз.

Микроорганизм *T. ferrooxidans* оказывает также большое влияние на процесс выщелачивания урана. В этом процессе основную роль играют образующиеся под влиянием жизнедеятельности бактерий серная кислота и сульфат окиси железа, которые растворяют и окисляют восстановленные соединения урана [Кузнецова Э. Г., 1970 г.]. Роль *T. ferrooxidans* как окислителя сульфидов общепризнанна, и в ряде зарубежных стран (США, Канада и др.) деятельность этого микроорганизма используется в гидрометаллургических процессах при выщелачивании цветных металлов в промышленных масштабах.

Бактериальный метод выщелачивания цветных металлов из забалансовых руд разрабатывается и в Советском Союзе [19]. Скорость выщелачивания сульфидов бактериальным методом зависит от многих факторов, среди которых главное значение имеют следующие: тонкое измельчение сульфидных минералов или руды, температура 20—35 °С, обильное снабжение кислородом, низкие значения рН (2,5—3,0), наличие необходимых для развития бактерий элементов (азота, фосфора).

В природных условиях процесс окисления сульфидных руд отличается значительно большей сложностью, чем в условиях эксперимента или при направленном использовании бактерий в гидрометаллургическом процессе. Природная обстановка характеризуется большим разнообразием факторов, влияющих на ход и развитие процессов окисления сульфидных руд [8, 25].

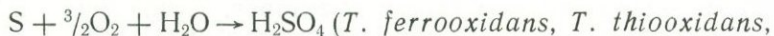
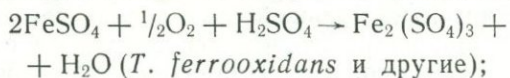
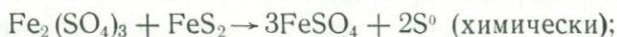
К таким факторам, в частности, относятся характер гидрогеологической обстановки, минералогический состав руд, дисперсность рудного вещества и др. Так, в результате микробиологического исследования редкометалльных руд было установлено, что тионовые бактерии наиболее широко распространены и активны в рудах месторождений, интенсивно тектонически нарушенных, где условия для развития процессов окисления более благоприятны, и реже — в рудах месторождений, слабо тектонически нарушенных.

Молибдениты, тонко рассеянные в кварце, менее населены тионовыми бактериями, чем молибдениты с крупно- и среднечешуйчатой структурой. Вид *T. ferrooxidans* чаще обнаруживался и был наиболее активен при выделении из руд, содержащих пирит и халькопирит.

Большое влияние на развитие процессов окисления сульфидных руд и миграцию халькофильных элементов в природных условиях оказывает физиологический групповой и видовой состав микроорганизмов. В природных условиях, как известно, чистых культур бактерий нет, поэтому окислительно-восстановительные биохимические процессы протекают под влиянием не одного какого-либо вида, а комплекса микроорганизмов, составляющих определенные микробиологические ассоциации, или ценозы.

В окислении сульфидных руд в природной обстановке принимают участие не только *T. ferrooxidans*, но и другие виды тионовых бактерий (*T. thiooxidans*, *T. denitrificans*, *T. thioparus*, *T. organoparus* и др.). Хотя названные виды тионовых бактерий, по утверждению некоторых исследователей, не способны непосредственно окислять сульфидные минералы, они также играют определенную роль в процессах миграции халькофильных элементов. Осуществляя свою основную биохимическую функцию, названные виды интенсивно окисляют свободную серу, которая образуется на поверхности окисляющихся сульфидов при взаимодействии с сернокислым окисным железом. Тем самым они способствуют доступу агрессивного растворителя к руде или минералу, создавая непрерывность в данном окислительном процессе.

Участие кислотолюбивых видов тионовых бактерий (*T. thiooxidans*, *T. organoparus*) в окислении сульфидных руд демонстрируют следующие химические реакции, протекающие при окислении пирита FeS_2 :



T. organoparus) [Каравайко Г. И., Ляликова Н. Н.,
Пивоварова Т. А., 1976 г.]

Косвенно участвуют в окислении сульфидных руд и щелочелюбивые виды тионовых бактерий: *T. denitrificans*, *T. thioparus*, *T. thiocyanoxidans*, *Thiobacillus* «у», — широко распространенные в нейтральных и щелочных водах многих сульфидных месторождений.

Все виды тионовых бактерий (кислотолюбивые и щелочелюбивые), окисляющие элементарную серу, участвуют в электрохимических процессах. Окисляя серу, которая постоянно образуется в электрических полях сульфидных месторождений согласно схеме $\text{MeS} - 2e \rightarrow \text{Me}^{2+} + \text{S}^0$ [Свешников Г. Б., 1967 г.], и освобождая от нее анодную часть сульфидной залежи, тионовые бактерии стиму-

лируют электрохимические процессы, способствуя переходу в раствор рудных элементов.

Как показали наши микробиологические и гидрохимические исследования, проводившиеся в Саяно-Алтайской области, Забайкалье, на Кавказе, в Казахстане, на Среднем Урале и в других горноскладчатых областях и районах СССР, концентрации халькофильных элементов в водах, связанных с породами, содержащими сульфиды, в присутствии тионовых бактерий при прочих равных условиях более высокие, чем в их отсутствие (табл. 24).

Благодаря способности отдельных видов тионовых бактерий развиваться при малом содержании свободного кислорода, т. е. в микроаэрофильных условиях (*T. thioparus*), или при полном его отсутствии (*T. denitrificans*) окислительные биохимические процессы могут протекать на больших глубинах, значительно превышающих глубину зоны окисления, определяемую геологами [Смирнов С. С., 1955 г.].

Тионовые бактерии обнаруживаются в водах артезианских бассейнов на глубинах $> 1,0$ тыс. м. Так, вышеназванные виды тионовых бактерий обнаружены нами в подземных водах южной части Западно-Сибирской низменности на глубине > 3 тыс. м (воды юрских и палеозойских отложений, вскрытые Омской опорной скважиной) [12, 30].

По данным опробования подземных вод рудных тел на месторождениях Восточном и Батыстау *T. ferrooxidans* часто встречается в водах как зоны окисления, так и более глубоких частей разреза (до глубины 400 м). На таких же глубинах в сульфидных месторождениях обнаружены и другие исследованные нами виды тионовых бактерий.

Влияние тионовых бактерий на вынос металлов из пород и их водную миграцию ярко выражено на исследованных нами месторождениях Среднего Урала (Дегтярское, Зюзельское, Гумишевское, Пышминское, Ключевское, Благодатное, Березовское). Биогенные процессы, связанные с окислением сульфидных руд, протекают здесь с разной интенсивностью, что зависит от геологического строения и гидрогеологических условий района и от степени оруденения пород. В зависимости от этих условий формируется определенный видовой состав и изменяется активность тионовых бактерий, принимающих участие в окислении сульфидных руд [31].

Наиболее интенсивно окислительные биохимические процессы, обуславливающие переход рудных элементов в раствор, протекают на Дегтярском медноколчеданном месторождении, где рудное тело отличается большой мощностью и сильной обводненностью. В водах месторождения развиты *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans*, *T. thioparus*, *T. trautweinii*. Воды характеризуются высокими концентрациями металлов (Fe, Cu и Zn до 5135 мг/л, Pb до 5,1 мг/л) и низкими значениями pH.

На Гумишевском медноколчеданном месторождении, где рудное тело находится в скарновой зоне на контакте известняков

Влияние тионовых бактерий на образование окисных, водно

Месторождение	Минерализация воды, г/л	рН	Активность тионовых бактерий		
			<i>T. ferrooxidans</i> (образовано Fe ²⁺ , мг/л)	<i>T. thiooxidans</i> (окислено Na ₂ S ₂ O ₃ , %)	<i>T. denitrificans</i> (образовано NO ₂ , мг/л)
Дегтярское медноколчеданное (Средний Урал)	50,8	1,88	240	67	0
	51,3	2,75	240	58	0
	32,6	2,5	240	100	0
	28,3	2,7	240	100	0
	3,1	5,8	7	100	30
	1,0	7,3	0	0	7,5
Пышминское медно-кобальтовое (Средний Урал)	0,4	7,8	48	16	15
	0,5	7,6	0	0	0
Белоканское медно-полиметаллическое (Кавказ)	0,3	4,0	20	9,2	4,5
	0,5	4,9	5	85	12
	0,2	6,0	5	100	12,5
	0,2	7,0	0	100	5
	0,2	8,0	0	0	0
	0,3	8,0	0	0	0
Наугарзансайское медно-молибденовое (Средняя Азия)	0,4	7,1	0	0	0
	0,4	7,2	0	0	0
Ангренское буроугольное (Средняя Азия)	0,2	7,9	15	100	До N ₂
	0,3	7,6	0	100	150
	0,1	7,1	0	0	0

с диоритами, биохимические процессы протекают слабо. Микроорганизмы *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans* здесь малоактивны или отсутствуют. Концентрации Fe до 2,14, Cu и Zn до 0,21 мг/л; рН = 7,1 ÷ 6,3.

На месторождениях, приуроченных к кварцевым жилам, содержащим вкрапленную сульфидную минерализацию (например, Березовское), биохимические процессы также развиты слабо. В подземных водах этих месторождений, имеющих щелочную реакцию, *T. ferrooxidans* отсутствует; *T. thiooxidans* отличается невысокой активностью [31].

По видовому составу тионовых бактерий, населяющих подземные воды сульфидных месторождений, можно судить о степени окисленности руд [табл. 25]. На глубоких горизонтах (430 м), где видовой состав тионовых бактерий представлен малоактивными *T. denitrificans* и *T. trautweinii*, окисление идет слабо, т. е. находится в начальной стадии. Содержания металлов в водах

растворимых форм элементов в подземных водах

Рудные элементы, мг/л							
Cu	Pb	Zn	Fe	Mo	Ag	Cd	Co
1524	1,52	5080	1524	—	—	—	—
5135	5,10	5135	5135	—	—	—	—
960	—	3200	960	—	—	—	—
228	2,28	2280	684	—	—	—	—
0,03	—	31	31	—	—	—	—
0,00001	—	—	0,0001	—	—	—	—
3,8	—	0	0,3	—	—	—	0,003
0,01	0	0	0,4	—	—	—	0
2,7	0,90	2,7	—	—	Сл.	—	0,03
0,53	1,43	0,4	—	—	Не обн.	—	Не обн.
0,004	0,004	1,6	—	—	То же	—	0,01
0,044	0,03	0,22	—	—	Сл.	—	0,006
0,001	0,001	Не обн.	—	—	Не обн.	—	Не обн.
0,01	0,002	То же	—	—	То же	—	То же
0,003	Не обн.	"	0,3	0,0002	Сл.	Не обн.	"
0,004	То же	0,02	0,02	0,01	"	То же	"
0,007	0,07	0,02	2,5	0,025	0,0002	0,75	"
0,008	0,02	Не обн.	0,8	0,027	0,0003	0,008	"
0,001	0,001	"	0,1	0,001	Сл.	0,14	"

низкие, значения рН отвечают щелочной реакции, минерализация вод невысокая. По мере активизации *T. denitrificans* и появления активного *T. thiooxidans* (при малоактивном *T. ferrooxidans*) содержания металлов заметно возрастают, значения рН уменьшаются, т. е. процесс окисления сульфидных руд переходит на более высокую стадию развития. Активизация *T. ferrooxidans* в горизонтах, расположенных ближе к поверхности Земли (370, 250 м), приводит к усилению окисления сульфидных минералов, которое сопровождается образованием весьма высоких концентраций железа, меди, цинка, свинца в подземных водах. Показатель рН подземных вод при этом уменьшается до кислых и очень кислых значений, минерализация вод сильно возрастает. С изменением химического состава вод изменяется и состав бактериальных ценозов в этих горизонтах. Виды *T. denitrificans*, *T. trautweinii* и *T. thioparus* исчезают. Не развиваются и гетеротрофы, растущие на МПА (табл. 25).

Стадийность процессов биогенного окисления сульфидов минералов на примере вод шахты «Капитальная»

Номер шахты; место взятия пробы	Горизонт, м	Минерализация воды, г / л	рН	Активность бактерий								Рудные элементы в водах, мг/л			
				<i>T. ferrooxidans</i> (образовано Fe ²⁺ , мг/л)	<i>T. thiooxidans</i> на среде с		<i>T. denitrificans</i> (образовано NO ₂ ⁻ , мг/л)	<i>T. thioparvus</i> (окислено Na ₂ S ₂ O ₃ , %)	<i>T. trautweinii</i> (окислено Na ₂ S ₂ O ₃ , %)	Сульфатвосстановли- вающие	Гетеротрофы (число клеток в 1 мл)	Fe	Cu	Zn	Pb
					S	Na ₂ S ₂ O ₃ (окислено, %)									
1; вода из трещины	430	1,0	7,3	0	0	0	7,5	10	28	0	1112	0,0001	0,00001	—	—
1; северный полевой штрек	430	3,1	5,85	1	—	100	30	0	0	0	513	До 31	0,03	До 31	—
2; вода из заторки	370	28,3	2,7	240	+++	100	0	—	—	0	0	До 865	До 288	2883	До 0,6
2; южный штрек, скв. 793	250	32,6	2,5	240	—	100	0	—	—	0	0	До 960	До 960	До 3200	—
2; скважина ниже полевого штрека	250	51,3	2,75	240	+++	67	0	—	—	0	0	До 5135	До 5135	До 5135	До 5,1
2; рудный спуск	250	50,8	1,88	240	+++	58	0	0	0	0	0	До 1524	До 1524	5080	До 1,52

Степень биогенной окисленности сульфидов, тесно увязанная с концентрациями металлов в подземных водах, свидетельствует о том, что только при глубоком окислении руд, осуществляемом биоценозом бактерий, в состав которого входят кислотолюбивые и кислотоустойчивые виды *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans* (а также, по-видимому, и *T. organoparus*), могут быть образованы наиболее высокие концентрации металлов в подземных водах. На начальных же стадиях окисления сульфидов, когда комплекс микроорганизмов, представленный щелочелюбивыми или растущими при нейтральной реакции среды *T. thioparus*, *T. trautweinii*, *T. denitrificans* и др., не обеспечивает глубокого окисления сульфидных минералов, высокие концентрации металлов в водах не образуются.

Таблица 26

Влияние тионовых бактерий на формирование ореолов водной миграции рудных элементов (составлена Е. Е. Беляковой и Л. Е. Крамаренко)

Месторождение	Характеристика металлоносности вод	Число проб	Активность бактерий (средние данные)		
			<i>T. thiooxidans</i> (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, %)	<i>T. ferrooxidans</i> (образовано Fe^{3+} , мг/л)	<i>T. denitrificans</i> (образовано NO_2^- , мг/л)
Западное	Аномалия рудного месторождения по Мо, W	21	55	0,65	46
	Ореол рассеянной минерализации по Мо, Mn, Sg	5	8	0,2	30
	Нормальный фон	2	0	0	0
Южное	Аномалия рудного месторождения по Мо, Sg	26	62	1,3	49
	Ореол рассеяния рудного месторождения по Мо, Sg	8	38	1,5	35
Батыстау	Аномалия рудного месторождения по Мо, Zn, Pb	9	12	0,58	23
Кок-Забой	Водный ореол рассеянной минерализации по Мо, Cu, Pb	8	0	2,5	7,0
Каратас	Водный ореол рассеяния рудного месторождения по Pb, ореол рассеянной минерализации по Мо	8	0	0	17

Микробиологические и гидрохимические исследования, проведенные автором совместно с Е. Е. Беляковой [44], А. В. Зуевым и О. М. Гирфановой [48], Г. И. Климовым [21] и др., показали, что геохимическая деятельность тионовых бактерий на сульфидных месторождениях приводит к формированию более контрастных гидрохимических аномалий таких элементов, как свинец, цинк, железо, молибден, мышьяк и др.

Вынос этих элементов из месторождений наиболее интенсивен, если биохимическому окислению подвергаются сульфиды, представленные в виде гнездовых скоплений, чешуек или примазок по трещинам, частично открытым для циркуляции подземных вод (месторождения Западное, Южное, Батыстау; табл. 26). С меньшей интенсивностью окисляются тонкодисперсные минералы в кварце при очень слабой активности водообмена (месторождение Шалгия).

Влияние на биогенное окисление сульфидов и водную миграцию халькофильных элементов оказывает длительность взаимодействия подземных вод, руд и тионовых бактерий в комплексе. При длительном контакте вод, пород и тионовых бактерий (месторождение Дегтярское) образуются высокие концентрации рудных элементов, при кратковременном этого не отмечается. Последний случай характерен для высокогорных районов. Так, содержание меди в подземных водах Удоканского месторождения, которое расположено на отметке около 2000 м над уровнем моря, составляет в среднем 0,0001 мг/л [21].

Таким образом, характер геохимической деятельности тионовых бактерий в природных условиях достаточно ясен. Различные виды этой группы микроорганизмов прямо или косвенно участвуют в окислении сульфидов, стимулируя вынос и миграцию рудных (халькофильных и др.) элементов из пород, содержащих рудную сульфидную минерализацию.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СУЛЬФАТВОССТАНАВЛИВАЮЩИХ БАКТЕРИЙ КАК ФАКТОР АККУМУЛЯЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сульфатвосстанавливающие бактерии широко распространены в природе. Их находят всюду: в воде и илах морей и озер, в сопочных грязях, в подземных водах.

В работе «Великие дела маленьких существ» В. О. Таусон [1948 г.] подчеркивает, что большая часть сероводорода, образующегося биогенным путем, обязана своим происхождением деятельности сульфатвосстанавливающих бактерий и значительно меньшая — деятельности других бактерий, в частности микробов, образующих сероводород при разложении ими серосодержащих белковых веществ.

Сероводород, обладающий большой химической активностью, реагирует с металлами и неметаллами, образуя множество минералов и пород (сернистых руд). Являясь сильным восстановите-

лем, он способствует созданию анаэробных условий, в которых могут сохраняться большие количества органических остатков, служащих материалом для образования нефти и газа. О влиянии сероводорода, образованного сульфатвосстанавливающими бактериями, на изменение окислительно-восстановительных условий среды их обитания Eh свидетельствуют данные, полученные нами при изучении жизнедеятельности чистых культур *D. desulfuricans*, выделенных из подземных вод на среде Таусона.

H ₂ S, мг/л	Eh, мВ
17	—60
27,2	—90
119	—230
136	—290
206	—330
340	—400
408	—390

Сульфатвосстанавливающие бактерии (*D. desulfuricans* и др.) оказывают отрицательное влияние на миграцию халькофильных элементов в подземных водах. На месторождениях, перекрытых чехлом рыхлых отложений, при затрудненном водообмене они активно развиваются. Эти бактерии наряду с различными физико-химическими факторами (сорбция элементов породами, неблагоприятные для миграции элементов значения pH) оказывают негативное влияние на формирование аномалий и водных ореолов рассеяния халькофильных элементов. Такие условия имеют место в пределах полиметаллических и медных месторождений Северо-Западного Прибалхашья (Кок-Забой, Белые Сопки, Каратас). Сульфатвосстанавливающие бактерии обнаружены нами в водах месторождений Казахстана Восточный Коунрад (молибденовое), Джекказган (меднорудное) и др. По данным М. М. Элинсон [1971 г.], на ряде месторождений Центрального Казахстана, в том числе и на упомянутом нами месторождении Каратас (Северо-Западное Прибалхашье), в подпочвенном слое содержится сероводород. Можно предполагать, что он биогенного происхождения. Широко распространены сульфатвосстанавливающие бактерии и в водах месторождений Северного Кавказа (Урупское [51], Худес и др.). Воды месторождения Худес, по данным Н. Н. Ляликовой и З. П. Дерюгиной [1968 г.], содержали 6,2 мг/л H₂S.

Влияние биогенного фактора на водную миграцию рудообразующих элементов изучалось нами при гидрохимических и микробиологических исследованиях в Чингиз-Тарбагатайской складчатой области. В 76 % исследованных проб воды обнаружена жизнедеятельная микрофлора. В бактериальных ценозах выявлены в основном аэробные формы тионовых бактерий (*T. thiooxidans*), реже факультативно-анаэробные (*T. denitrificans*). Этот состав бактерий свидетельствует о существовании здесь аэробной гидробиохимической зоны, в которой протекают окислительные биохимические процессы, сопровождающиеся

выносом из пород рудных элементов и переходом их в подземные воды.

На отдельных участках исследованной территории выделяются воды, связанные с водовыводящими разломами и активными тектоническими контактами. В пробах воды, отобранных на таких участках, обнаружены анаэробные сульфатвосстанавливающие бактерии, которые находятся здесь в активном состоянии. Присутствие этих микроорганизмов можно рассматривать как показатель наличия в недрах гидрогеологических структур этой территории смешанной (а возможно, и анаэробной) гидробιοхимической зоны, которая характеризуется тем, что в ее пределах протекают восстановительные биогеохимические процессы, обуславливающие переход рудных элементов из вод в породы. Вследствие этого на участках, где развиты анаэробные сульфатвосстанавливающие бактерии, концентрации рудных элементов в водах могут быть угнетены.

Биогеохимическая деятельность тионовых и сульфатвосстанавливающих бактерий на территории Чингиз-Тарбагатайской складчатой области изучалась в водах аномальных гидрохимических полей, выделенных Е. Е. Беляковой.

В результате микробиологических исследований вышеуказанных вод выделены три группы гидрогеохимических аномальных полей.

- 1) аномалии, в которых получили развитие только тионовые бактерии (типа *T. thiooxidans*);
- 2) аномалии, где наряду с тионовыми присутствовали и сульфатвосстанавливающие бактерии;
- 3) аномалии, в которых ни тионовые, ни сульфатвосстанавливающие бактерии обнаружены не были.

Влияние тионовых и сульфатвосстанавливающих бактерий на водную миграцию химических элементов отражено в табл. 27.

Из табл. 27 видно, что максимально аномальные концентрации В, F, К, Мо, Р и Мп установлены в тех водах, где микроорганизмы в целом (тионовые и сульфатвосстанавливающие) присутствовали (аномалии 349, 378, 33, 266, 401, 117, 86), и эти элементы в максимально аномальных концентрациях не были обнаружены в отсутствие бактерий (аномалии 89, 100). В том и другом случае установлена сурьма Sb. В среднеаномальных концентрациях элементы F, Мо, Sb и Sg обнаружены как в присутствии названных бактерий, так и без них, но Ag, Cd, Pb и Zn содержались только в тех водах, где развивались бактерии. В минимально аномальных концентрациях выявлены в обоих случаях Ag, F, Мо, Sb, Sn, Sg, а Pb, Со, Cu, Zn, La, Mn, Ni и Zr не были обнаружены в водах, где бактерии отсутствовали.

Таким образом, тионовые бактерии как в присутствии, так и в отсутствие сульфатвосстанавливающих бактерий в данной гидрогеологической обстановке оказывают влияние на освобождение из пород и образование аномальных концентраций в водах многих элементов. Особенно заметно их влияние на миграцию халько-

Степень концентрации химических элементов в минеральной составляющей природных вод в присутствии и при отсутствии бактерий

Номер аномалий	Аномальность содержаний элементов в минеральной составляющей вод		
	максимальная	средняя	минимальная
Тионовые бактерии			
349	B, F, Mn	Zn	Mo, Ag
378	B, F	Zn	Mo
44	Sb	—	Mo
48	Sb	F, Mo	F
33	Mo, Sb	Mo, Zn	F, Cu
266	F	Zn	Mo, Ag
35	Sb	—	Mo, Ni
47	Sb	Mo, F	—
108	Sb	—	Mo
58	Sb	Mo	F
401	B, F, P	Zn, Sr	Mo, Ag, F, Sr
233	—	Mo, Sr	Mo, Sr, F, Ni, Zr
565	—	Sb, Zn	Mo, La, Ni
570	—	Sb, Sr	Mo, Ag
609	—	Mo, Ag	Cu
262	—	—	F, Mo, Sn, Zn, Ag, Sr
290	—	—	Mn, Zn, Mo, F, Sr, Ag, Ni, Co
265	—	—	Mo, Sr, F
272	—	—	Mo, Ag, Sr

Тионовые+сульфатовосстанавливающие бактерии

117	F	Mo, Sr	—
86	Sb, Mo, K	—	F, Ag, Sn
51	—	Sb, Sr	Mo, Ag
582	—	Sb, Mo, Ag, Sr	Mo, Sn, Ag, Sr, F
275	—	Sr, Mo, Zn, Cd	Mo, Zn, Sn, Ag, Ni, F
118	—	Sr, Mo, F	—
95	—	F, Sr	Mo
612	—	Sr	Sb, Pb, Cu, Mo, Ag

Бактерии отсутствуют

89	Sb	Mo	Mo, Sr
100	Sb	Mo	F
91	—	Sb, Mo, F	Sr
94	—	F	Sb, Mo, Sr
102	—	Sb, Mo, F	Ag, Sr
139	—	Sb, Mo	Sn, F
598	—	Mo	F
620	—	Sr	Mo
96	—	—	Mo

фильных элементов, что вполне закономерно, так как именно эти микроорганизмы участвуют в окислении сульфидных руд и обуславливают водную миграцию халькофильных элементов.

Наряду с миграцией халькофильных элементов хорошо мигрируют в присутствии бактерий и нехалькофильные. Образование аномальных концентраций нехалькофильных элементов связано, по-видимому, с жизнедеятельностью других, не выявленных нами микроорганизмов, существование которых в исследованных водах весьма возможно.

Влияние сульфатовосстанавливающих бактерий на миграцию рудных элементов наиболее отчетливо выражено в аномалиях, характеризующихся минимальными концентрациями. В них оказались угнетенными концентрации Ni и Zn, т. е. в присутствии сульфатовосстанавливающих бактерий эти элементы мигрируют плохо. В аномалиях со среднеаномальными концентрациями элементов наблюдалось отрицательное влияние сульфатовосстанавливающих бактерий на миграцию цинка. Этот элемент обнаружен в тех водах, где сульфатовосстанавливающие бактерии отсутствовали (аномалии 349, 401, 565, 378, 33, 266) и только в одном случае (аномалия 275) цинк был обнаружен в присутствии названных бактерий. В аномалиях с максимально аномальными концентрациями элементов влияние сульфатовосстанавливающих бактерий на миграцию рудных элементов наблюдалось в аномалии 117.

Обитающие в водах микроорганизмы оказывают влияние не только на миграцию рудных (халькофильных) элементов, но и на формы их нахождения. Исследования показали, что устойчивость некоторых халькофильных элементов в растворе в сульфатной форме связана с жизнедеятельностью тионовых бактерий. Большую роль при этом играет активность названных бактерий.

При сопоставлении активности обитающих в исследованных водах тионовых бактерий (*T. thiooxidans*) с характеристикой форм нахождения меди выявлена следующая зависимость. В водах, где вид *T. thiooxidans* отличается высокой активностью (окислено 100 % внесенного в среду гипосульфита), аномалии 401 и 349, содержание сульфатных комплексов меди (CuSO_4) составило соответственно 49,9 и 35,6, при меньшей активности *T. thiooxidans* (окислено 57 и 26 % внесенного в среду гипосульфита), аномалии 33 и 47 — 18,15 и 0,18 %. В водах, где тионовые бактерии малоактивны, медь находилась преимущественно в коллоидной форме (формы нахождения меди определялись Н. П. Никитиной).

Влияние сульфатовосстанавливающих бактерий на миграцию халькофильных элементов изучалось нами экспериментально. Вначале опыты проводились с железом и молибденом на среде Таусона. Состав ее следующий.

Водопроводная вода, л	1
K_2HPO_4 , г	0,5
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, г	4,0
CaSO_4 , г	2,5

MgSO ₄ ·7H ₂ O, г	1,0
Соль Мора, г	0,5
Лактат Са, г	3,5
pH среды	7,0—7,4

В исследованиях, проводившихся с железом, соль Мора из среды исключалась. Fe²⁺ в указанную среду вносили в количестве 720 и 2500 мг/л. Продолжительность опытов 30 сут. В результате установлено, что в присутствии бактерий внесенное в среду железо выпадало из раствора от 66 до 99,7 % за указанный срок инкубации. В отсутствие бактерий железо из раствора выпало только в одном случае (14 %).

Опыты, проведенные с молибденом [25], показали, что этот элемент под влиянием сероводорода, образованного сульфатвосстанавливающими бактериями, выпадал из раствора до 100 % в течение 15—35-суточной инкубации. В отсутствие биогенного сероводорода почти весь внесенный в среду молибден сохранялся в растворе. Значительно слабее осаждался молибден, когда через раствор пропускали сероводород химического происхождения, даже если его концентрация превышала концентрацию биогенного сероводорода (табл. 28). Это свидетельствует о более высокой активности биогенного сероводорода по сравнению с хемогенным.

Таблица 28

Количество молибдена, выпавшего из раствора под влиянием биогенного и химического сероводорода

Вариант опыта	Биогенный сероводород (концентрация 70—250, мг/л)		Химический сероводород (концентрация 300—1000 мг/л)	
	Мо, мг/л	Мо, %	Мо, мг/л	Мо, %
1	0,9	90	0,3	30
2	1,0	100	0,65	65
3	0,95	95	0,7	70
4	1,0	100	0,4	40
5	1,0	100	0,1	10
6	0,8	80	—	—
В среднем	0,9	94,2	0,4	43,0

Примечание. Исходное количество молибдена 1 мг/л, продолжительность опыта 45 сут.

Совместно с Е. Е. Беляковой, Н. П. Никитиной и И. Н. Ша-рыхиной изучалось поведение свинца, цинка, меди и мышьяка в водах в присутствии сульфатвосстанавливающих бактерий, органического вещества (питательная среда Таусона, на которой развивались сульфатвосстанавливающие бактерии) и карбонатных пород.

Схема опытов следующая.

1. Питательная среда для сульфатовосстанавливающих бактерий (среда Таусона) + халькофильные элементы, без бактерий.
2. Та же среда и те же элементы + бактерии.
3. Та же среда и те же элементы + карбонатная порода, без бактерий.
4. Та же среда и те же элементы + бактерии.

Халькофильные элементы выносились в среду соответственно в форме Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , AsO_3^{3-} в строго определенных весовых количествах из расчета 10 мг/л. В качестве карбонатных пород использовался органогенный обломочный известняк (отобран в 1957 г. в Приморском крае, в верховьях р. Высокогорской) из коллекций А. И. Жамойды, любезно предоставленный Н. С. Забалуевой. Для опытов известняк дробили до 0,25 мм, затем указанные фракции подвергали трехкратной стерилизации сухим жаром при 180 °С в течение 6 ч. После завершения опытов раствор отфильтровывали через «белую ленту», в фильтрате аналитически определяли равновесные концентрации Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} с разрушением возможных комплексных соединений и коллоидных форм металлов в растворе и без разрушения таких форм. Для разрушения комплексных коллоидных форм халькофильных элементов в растворе применяли метод мокрого сжигания с последующим прокаливанием осадков в муфеле при 400 °С. В начале и в конце опытов измеряли Eh и pH среды. Сульфатредукция осуществлялась чистыми культурами активных сульфатовосстанавливающих бактерий, выделенных из подземных вод Молдавского артезианского бассейна. Во всех опытах использовалась одна и та же бактериальная культура. Опыты дву- и трехкратно повторяли, затем выводили средние данные. Их продолжительность от 7 до 17 сут в зависимости от интенсивности сульфатредуцирующего процесса.

Результаты опытов позволили сделать заключение, что жизнедеятельность сульфатовосстанавливающих бактерий, питательная среда и карбонатная порода влияют на устойчивость и формы нахождения в растворе свинца, цинка и меди (табл. 29—32).

Как видно из табл. 29, свинец активно вступает в реакции с органическими и минеральными компонентами питательной среды, образуя при этом в основном устойчивые в растворе комплексы, легко разрушаемые при мокром сжигании. Однако часть свинца (около 20 %) уходит из раствора в осадок.

Жизнедеятельность сульфатовосстанавливающих бактерий вызвала изменение Eh среды от +0,190 до -0,265 В. В этих условиях незакомплексованные формы Pb^{2+} в растворе не обнаружены. Основная его масса находилась в закомплексованных формах. Потери свинца в опытах с бактериями составили 40 %, в том числе 20 % ушло из раствора под воздействием питательной среды, дополнительные потери под влиянием процессов биогенной сульфатредукции — около 20 %. Эти потери, несомненно, обусловлены процессом биогенного сульфидообразования.

Таблица 29

Данные о влиянии сульфатовосстанавливающих бактерий на поведение свинца в растворе

Серия опыта	Условия опыта	рН		Eh, В		Содержание Pb ²⁺ , мг/л				Потери Pb ²⁺ общ' %
		до опыта	после опыта	до опыта	после опыта	до опыта	после опыта, свободного, незакомплексованного	после опыта, связанного в комплексе	после опыта, суммарное	
I	Среда + Pb ²⁺	6,8	6,7	+ 0,190	0	10	0,2	7,8	8,0	20
II	Среда + Pb ²⁺ + бактерии	6,8	6,4	+ 0,190	-0,265	10	0	6,0	6,0	40
III	Среда + Pb ²⁺ + порода	7,0	7,2	+ 0,190	Не опр.	10	0,8	1,1	1,9	81
IV	Среда + Pb ²⁺ + порода + бактерии	7,0	6,9	+ 0,190	-0,315	10	0	1,2	1,2	88

Таблица 30

Данные о влиянии сульфатовосстанавливающих бактерий на поведение цинка в растворе

Серия опыта	Условия опыта	рН		Eh, В		Содержание Zn ²⁺ , мг/л				Потери Zn ²⁺ общ' %
		до опыта	после опыта	до опыта	после опыта	до опыта	после опыта, свободного, незакомплексованного	после опыта, связанного в комплексе	после опыта, суммарное	
I	Среда + Zn ²⁺	6,9	7,2	+ 0,200	+ 0,200	10	0,6	3,4	4,0	54,0
II	Среда + Zn ²⁺ + бактерии	6,9	7,2	+ 0,200	- 0,400	10	0,4	0,56	0,6	93,6
III	Среда + Zn ²⁺ + порода	7,2	7,4	+ 0,200	+ 0,030	10	0,5	2,7	3,2	63,0
IV	Среда + Zn ²⁺ + порода + бактерии	7,2	7,4	+ 0,200	- 0,450	10	Сл.	0,2	0,2	98,0

Данные о влиянии сульфатвосстанавливающих бактерий на поведение меди в растворе

Таблица 31

Серия опыта	Условия опыта	pH		Ен, В		Содержание Cu^{2+} , мг/л				Потери Cu общ. %
		до опыта	после опыта	до опыта	после опыта	до опыта	после опыта, незакомплексованного	после опыта, связанного в комплексе	после опыта, суммарное	
I	Среда + Cu^{2+}	6,7	7,0	+ 0,150	+ 0,150	10	2,5	4,5	7,0	30
II	Среда + Cu^{2+} + бактерии	6,7	7,1	+ 0,150	- 0,265	10	0	0,1	0,1	99
III	Среда + Cu^{2+} + порода	6,7	7,2	+ 0,150	- 0,100	10	3,1	1,9	5,0	50
IV	Среда + Cu^{2+} + порода + бактерии	6,7	7,2	+ 0,150	- 310	10	0	0,07	0,07	99,3

Данные о влиянии сульфатвосстанавливающих бактерий на поведение мышьяка в растворе

Таблица 32

Серия опыта	Условия опыта	pH		Ен, В		Содержание As, мг/л		Потери As, %
		до опыта	после опыта	до опыта	после опыта	до опыта	после опыта	
I	Среда + As	6,9	6,9	+ 0,150	+ 0,050	10	10,0	0
II	Среда + As + бактерии	6,9	6,8	+ 0,150	- 0,100	10	4,0	60
III	Среда + As + порода	6,9	7,2	+ 0,150	Не опр.	10	10,0	0
IV	Среда + As + порода + бактерии	6,9	7,2	+ 0,150	- 0,200	10	2,5	75

Примечание. Метод определения мышьяка основан на восстановлении всех находящихся в растворе его форм до газообразного мышьяковистого водорода. Измеренные концентрации последнего пересчитывались на элементарный мышьяк.

Измельченный известняк, введенный в опыт в отсутствие бактерий, способствует удалению из раствора заметного количества свинца (потери его с учетом влияния питательной среды составляют 61 %). В присутствии сульфатовосстанавливающих бактерий это количество несколько возрастает. С учетом свинца, осажденного при взаимодействии с питательной средой (20 %) и с карбонатами кальция породы (61 %), потери его за счет процессов биогенного синтеза сульфидов составляют около 7 %.

Приведенные данные показывают, что процесс биогенного синтеза сульфидов свинца идет очень медленно. Это, однако, не снижает его значения в геохимических процессах, продолжительность которых значительно превышает таковую наших опытов.

Цинк еще более энергично, чем свинец, вступает в реакции с органическими и минеральными компонентами питательной среды. При этом, в отличие от свинца, более половины его количества в системе (54 %) удаляется из раствора в осадок (табл. 30). В присутствии сульфатовосстанавливающих бактерий в растворе были обнаружены лишь следы ионов Zn^{2+} , немного цинка оказалось связанным в неустойчивых комплексах. Значительная же часть этого элемента ушла из раствора в виде прочных соединений (потери более 40 % с учетом прочных комплексов с аддендами питательной среды). Уход цинка из раствора в присутствии сульфатовосстанавливающих бактерий можно объяснить только процессами сульфидообразования.

В присутствии измельченного известняка и сульфатовосстанавливающих бактерий в растворе обнаружено весьма незначительное количество цинка. Основная же его масса была удалена из раствора в результате взаимодействия с питательной средой (54 %), с карбонатами кальция (9 %) и биогенного синтеза сульфида цинка (35 %). Как видно из этих данных, процессы удаления из раствора цинка в виде прочных комплексов с аддендами питательной среды и биогенного сульфидообразования идут более активно по сравнению с аналогичными процессами свинца.

В этой связи представляют интерес данные, полученные в опытах Е. В. Рожковой, Э. Г. Кузнецовой и Э. Г. Васильевой [1965 г.], по фиксации цинка и свинца в зараженных и не зараженных культурой сульфатовосстанавливающих бактерий кварцевом песке, каолините и бентоните, куда дополнительно вносились сульфаты, цинк и свинец. Установлено, что процесс сульфидообразования, по-видимому, разбивается в два этапа. На первом этапе происходит сорбция свинца и цинка породами, а на втором — образование их биогенных сульфидов. Этими же авторами показано, что образование сульфидов железа и понижение Eh среды могут происходить под влиянием сульфатовосстанавливающих бактерий, как внесенных водой, так и содержащихся в самой породе [Рожкова Е. В., Кузнецова Э. Г., Васильева Э. Г., 1968 г.].

Как видно из табл. 31, медь — элемент с переменной валентностью — в геохимических процессах (Cu^{2+} , Cu^{+}) так же взаимодействует с органическими и минеральными компонентами

питательной среды, как и свинец. Значительная часть меди при этом остается в растворе в виде комплексов, легко разрушаемых мокрым сжиганием. Небольшая часть меди находится в растворе в виде иона Cu^{2+} , около 30 % этого элемента удаляется из раствора в осадок. В результате развития сульфатовосстанавливающих бактерий в растворе остались лишь следы закомплексованной меди. Практически вся медь (99 %; см. табл. 31) была удалена из раствора в осадок, причем значительная доля (69 %) падает, очевидно, на сульфиды этого элемента.

В процессе опыта менялись окислительно-восстановительные условия среды. В опыте, где активно развивались сульфатовосстанавливающие бактерии, в присутствии биогенного сероводорода при отрицательных значениях E_h среды могут происходить и, очевидно, происходили в нашем опыте процессы образования сульфидов как одновалентной меди (ПР $\text{Cu}_2\text{S} = 2 \cdot 10^{-47}$), так и двухвалентной (ПР $\text{CuS} = 4 \cdot 10^{-38}$). Столь низкие значения произведения растворимости указанных сульфидов способствовали в свою очередь разрушению других комплексных форм меди и дополнительному уходу ее из раствора. Возможное присутствие в этих условиях коллоидной меди также должно было способствовать уходу меди из раствора при биогенном сульфидообразовании.

Введение в среду измельченного известняка не вызвало снижения концентрации в растворе ионов Cu^{2+} , однако вызвало дополнительное удаление из раствора небольшого количества (около 20 %; см. табл. 31) этого элемента. Активное развитие сульфатовосстанавливающих бактерий вызвало дополнительный процесс удаления меди из раствора в осадок. Так же как и в опыте без измельченного известняка, практически вся медь оказалась удаленной из раствора в осадок.

Таким образом, биогенный синтез сульфидов меди, как одновалентной, так и двухвалентной, происходит более энергично, нежели синтез сульфидов цинка и особенно свинца. Следовательно, в природных условиях вероятность образования седиментогенных и диагенетических концентраций сульфидов меди в осадочных породах при активном участии биохимических процессов большая, нежели сульфидов цинка и особенно свинца. Этот вывод вполне согласуется с общеизвестным фактом широкого распространения меденосных осадочных пестроцветных толщ в геологических структурах, в которых свинец и цинк чаще всего являются второстепенными и сопутствующими элементами руд.

Несколько иным было поведение в опытах этого цикла мышьяка — слабого электроположительного элемента с переменной валентностью, образующего комплексные анионы с кислородом. Как видно из табл. 32, питательная среда не вызвала осаждения мышьяка из раствора. При изменении E_h среды в ходе опыта изменились, по-видимому, лишь формы этого элемента. В начале опыта ($\text{pH} = 6,9$; $E_h = +0,150 \text{ В}$) в растворе присутствовали две формы мышьяка: H_3AsO_4 и H_3AsO_3 — примерно в равных количествах.

В конце опыта ($pH = 6,9$; $Eh = +0,050$ В) изменились соотношения равновесных концентраций форм пяти- и трехвалентного мышьяка в сторону преобладания в растворе H_3AsO_3 над H_3AsO_4 .

При активном развитии сульфатовосстанавливающих бактерий более половины мышьяка (60 %) было удалено из раствора в осадок, а оставшийся в растворе при $Eh = -0,100$ В, $pH = 6,8$ (в конце опыта с бактериями) находился преимущественно в трехвалентной форме. Биогенный сероводород мог взаимодействовать только с трехвалентным мышьяком, осаждая его в форме сульфидов. Сульфид мышьяка As_2S_3 , произведение растворимости которого очень низкое ($IP\ As_2S_3 = 4 \cdot 10^{-29}$), в момент своего образования особенно активен и способствует диссоциации мышьяковистой кислоты H_3AsO_3 (константа диссоциации $5,1 \cdot 10^{-10}$). Поэтому в опыте с бактериями потери мышьяка в растворе составили около 60 %. Измельченный известняк, находящийся в среде, не вызвал осаждения мышьяка из раствора. При наличии сульфатовосстанавливающих бактерий в карбонатной среде значительная часть мышьяка (75 %) выпала из раствора в осадок. Оставшийся в растворе мышьяк мог находиться в нем при $pH = 7,2$ и $Eh = -0,200$ В в форме AsO_2^- .

Таким образом, геохимическая деятельность сульфатовосстанавливающих бактерий оказывает влияние на характер и состояние физико-химического равновесия в природных водах, а также на поведение химических (рудных) элементов в растворах. Рассматриваемые бактерии вызывают образование и накопление сероводорода, под влиянием которого халькофильные элементы удаляются из растворов в форме сульфидов в последовательности $Cu > As > Zn > Pb$. Эти данные представляются важными при изучении условий как осадочного, так и эпигенетического сульфидного рудообразования.

В последнее время заметно усилилось внимание исследователей к роли биогенного фактора в осадочном рудообразовании. Интерес к этому вопросу возник в связи с новым этапом в развитии учения о генезисе рудных месторождений в осадочных толщах. «Как в советской, так и зарубежной научной литературе сейчас накопилось уже немало работ, авторы которых, используя новые фактические данные, обосновывают осадочное или осадочно-метаморфическое происхождение многих из тех рудных месторождений, которые ранее при более поверхностном их изучении принимались за гидротермальные или метасоматические» [Пустовалов Л. В., 1961 г., с. 7].

Развитию этой проблемы во многом способствовало учение В. И. Вернадского о живом веществе биосферы. Геохимическая деятельность живого вещества (в том числе и микроорганизмов) находит свое отражение в работах многих исследователей. А. В. Лапо [1977 г., 38] систематизировал и обобщил обширный фактический материал по общим вопросам указанной проблемы, накопленный советскими учеными за последние десятилетия, показал аспекты геохимической деятельности живого вещества

и некоторые факторы формирования биогенных пород и руд, установил новые закономерности их формирования.

Рассматривая известные положения Л. В. Пустовалова, Н. М. Страхова и других ученых, обосновавших теорию осадочного рудообразования, нельзя, однако, не отметить, что роль биогенного фактора (микроорганизмов) в данном вопросе освещена слишком слабо. Между тем процессы переотложения и концентрации галенита, сфалерита, пирита и других минералов во многом, а для некоторых стадий полностью зависят от деятельности микроорганизмов [26].

Согласно Н. М. Страхову [1960 г.], процесс формирования рудных месторождений (медно-свинцово-цинковых) осадочного типа протекает в две стадии. В первую стадию происходит окисление рудных компонентов, содержащихся в исходных материнских породах, что приводит к образованию кислородных соединений металлов, во вторую — восстановление окисных форм металлов до сульфидов (стадия сульфидизации).

Современные данные по геологической микробиологии позволяют утверждать, что начиная с момента образования рудных растворов при окислении первичных сульфидов и кончая стадией сульфидизации биогенный фактор оказывает большое влияние на формирование сульфидных месторождений как седиментогенного, так и эпигенетического типов. В условиях формирования этих двух типов месторождений есть много общих черт. Окисление сульфидных минералов (первая стадия рудообразующего процесса) осуществляется в основном тионовыми бактериями. Роль тионовых бактерий заключается в активизации процесса окисления сульфидных минералов, а следовательно, в усилении выноса металлов из материнских пород, содержащих сульфидную минерализацию.

Результаты проведенных нами микробиологических и гидрогеохимических исследований подземных вод сульфидных месторождений в различных районах Советского Союза показали, что только в условиях, при которых активно развиваются тионовые бактерии, образуются весьма высокие концентрации Cu, Pb, Zn, Mo и др. Там, где названные бактерии отсутствуют, концентрации металлов в водах, как правило, более низкие (см. табл. 24).

Наиболее интенсивно первая стадия рудообразующего процесса протекает в условиях свободного водородного потенциала и низких значениях pH, в которых активно развиваются аэробные кислотолюбивые виды тионовых бактерий (аэробная гидробиохимическая зона).

Что касается второй стадии формирования рудных месторождений седиментогенного и эпигенетического типов — стадии сульфидизации, то она при низких температурах, без участия бактерий, по нашему мнению, вообще осуществляться не может.

Для развития второй стадии рудообразования необходимо накопление в среде такого количества сероводорода или сульфид-

ионов, которого было бы достаточно для изменения хода процесса в сторону сульфидообразования. Такой весьма существенный сдвиг физико-химического равновесия в гипергенных условиях при нормальных температуре и давлении могут обеспечить лишь биохимические процессы. Эта стадия протекает в условиях затрудненного водообмена при высоком отрицательном окислительно-восстановительном потенциале и высоких значениях рН, где активно развиваются сульфатвосстанавливающие бактерии или где присутствует образованный ими биогенный сероводород (анаэробная гидробиохимическая зона).

Таким образом, первая и вторая стадии рассматриваемого рудообразующего процесса пространственно разобщены, так как для их развития требуются совершенно разные гидрогеологические, физико-химические и биохимические условия. Развитие двух стадий сульфидного рудообразования нам совместно с гидрогеологом Д. А. Рожковой удалось наблюдать в современной обстановке при изучении условий миграции и аккумуляции рудных (халькофильных) элементов на Белокавказском (Кавказ) медно-полиметаллическом месторождении.

Первая стадия — окисление первичных сульфидов и вынос рудных элементов — протекала, как видно из табл. 33, на участках свободного водообмена при непосредственном контакте подземных вод с рудным телом, где сульфатвосстанавливающие бактерии отсутствовали, но развивались *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans*, *T. thioparus*. В этих условиях под влиянием перечисленных видов бактерий подземные воды оказались обогащенными комплексом элементов, характерных для медно-полиметаллического месторождения: медью, свинцом, цинком, кобальтом и марганцем, содержания которых соответствуют аномалии рудного вещества (Pb) и ореолу рассеяния его (Cu, Zn, Co, Mn) *. Вторичные сульфиды во вмещающих породах не обнаружены.

Вторая стадия рудообразующего процесса, связанная с восстановлением окисных воднорастворимых форм металлов, осуществлялась в условиях затрудненного водообмена, где активно развивались сульфатвосстанавливающие бактерии и слабо тионовые (обнаружен только вид *T. thioparus*). В этом случае подземные воды не отличались повышенными концентрациями рудных элементов; под влиянием сульфатвосстанавливающих бактерий в них образовался биогенный сероводород, а во вмещающих породах возникли вторичные сульфиды (табл. 33).

По данным ряда исследователей [Архангельский А. Д., Соловьев Н. В., 1938 г.; Яковлева М. Н., 1952 г.], в осадочных породах, где в ходе седиментации медь, свинец и цинк осаждались в карбонатной форме, впоследствии под влиянием H_2S возникали сульфиды этих металлов. Возможность и условия данного процесса экспериментально изучены Е. З. Бурьяновой и Л. Е. Крамаренко [4].

* По классификации Е. Е. Беляковой [1962 г.].

Микробиологические и гидрогеохимические условия возникновения

Место отбора пробы	Формула Курлова	рН	Содержание		
			Cu	Zn	Pb
Зона свободного					
Штольня 14	$M_{0,3} \frac{SO_4 97}{Mg 54 Ca 45}$	4	0,9	0,9	0,33
Штольня 14 (устье)	$M_{0,49} \frac{SO_4 81 HCO_3 16}{Ca 66 Mg 34}$	4,9	0,13	$9 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$
Штольня 16	$M_{0,23} \frac{SO_4 73 HCO_3 24}{Ca 47 Mg 33}$	6	$2 \cdot 10^{-3}$	0,7	$2 \cdot 10^{-3}$
Зона затруднен					
Скв. 42	$M_{0,17} \frac{HCO_3 77 Cl 13}{(K + Na) 90}$	8	$1 \cdot 10^{-3}$	0	$1 \cdot 10^{-3}$

Опыты по биогенному синтезу сульфидов из карбонатов Cu, Pb, Cd проводились на среде Таусона в условиях, соответствующих застойным водам или захороненным водным растворам, т. е. при статическом положении жидкой фазы. Для опытов применялись как чистые культуры сульфатвосстанавливающих бактерий (*Desulfovibrio desulfuricans*), выделенные из подземных вод Джезказганского месторождения меди, так и подземные воды, содержащие этот вид бактерий (табл. 34).

Серия опытов I проводилась с медистыми песчаниками и гравелитами, а также с выделенными из них минералами тяжелых фракций. Сульфатредукция осуществлялась чистыми культурами сульфатвосстанавливающих бактерий (*D. desulfuricans*). Эта серия опытов характеризовалась тем, что развитие бактерий и накопление биогенного сероводорода происходили в присутствии исследуемых материалов (медистых песчаников и гравелитов). В серии опытов II применялись минералы тяжелых фракций медистых песчаников. Развитие чистых культур сульфатвосстанавливающих бактерий протекало вне связи с исследуемыми минералами тяжелой фракции, т. е. биогенный сероводород накап-

первой и второй стадий рудообразующего процесса

в воде, %			Вмещающие породы	Интенсивность развития бактерий					
Ni	Co	Mn		<i>T. ferrooxidans</i> (образовано Fe ²⁺ , мг/л)	на среде S	на гипосульфите (окислено Na ₂ S ₂ O ₃ , %)	<i>T. denitrificans</i> (образовано NO ₂ ⁻ , мг/л)	<i>T. thioparus</i> (окислено Na ₂ S ₂ O ₃ , %)	сульфатвосстанавливающих
водообмена									
$3 \cdot 10^{-2}$	$13 \cdot 10^{-2}$	0,29	Глинистые сланцы и руды (вторичные сульфиды не обнаружены)	20	++	9,2	45	0	0
0	0	0,29	То же	5	+++	84,8	12	0	0
$7 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	0,7	"	5	+++	100	12,5	100	0
ного водообмена									
0	0	$1 \cdot 10^{-3}$	Глинистые сланцы и руды (вторичные сульфиды обнаружены)	0	0	0	0	100	+++

ливался на среде Таусона, а затем вносился в опыт. Последняя (III) серия опытов, так же как и серия II, проводилась с тяжелыми фракциями медистых песчаников, но здесь были использованы не чистые культуры сульфатвосстанавливающих бактерий, а подземные воды, содержащие названные бактерии. Причем в подземных водах наряду с сульфатвосстанавливающими бактериями содержались и тионовые (*T. thioparus* и *T. denitrificans*).

Различные варианты опытов, отражающие возможные случаи биогенного синтеза сульфидов в природной обстановке, показали, что восстановление карбонатов меди, свинца и кадмия до сульфидов может протекать как в присутствии сульфатвосстанавливающих бактерий, так и без них, т. е. за счет сероводорода, привнесенного извне (в данных опытах биогенного).

Наиболее полно и интенсивно биогенный синтез сульфидов протекал при отсутствии деятельности тионовых бактерий (I и II серии опытов). В этих условиях, соответствующих анаэробной гидробиохимической зоне, получены ковеллин CuS, галенит PbS, гринокит CdS и халькопирит CuFeS₂ (табл. 34).

Экспериментальные данные о биосинтезе сульфидов

Серия опыта	Число опытов (крупность фракций, мм)	Условия опыта	Исходный материал	Полученный материал	Бактерии, определявшие процесс биосинтеза
I	6 (0,5—0,25)	Чистые культуры сульфатовосстанавливающих бактерий	Медистые песчаники и гравелиты, содержащие карбонаты Ca, Cu, Pb, Cd, концентраты карбонатов Ca, Cu, Pb	CuS, PbS, CdS, CuFeS ₂	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>
II	4 (0,25—0,15)	Чистые культуры сульфатовосстанавливающих бактерий	Фракции, содержащие карбонаты	CuS, PbS, CdS	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>
III	4 (0,25—0,15; 0,15—0,01)	Подземные воды, содержащие сульфатовосстанавливающие и тионовые бактерии	То же	CuS	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i> , <i>Thiobacillus thioparus</i> , <i>T. denitrificans</i>

Биогенный синтез сульфидов протекал слабо, когда наряду с сульфатовосстанавливающими бактериями развивались окисляющие сероводород тионовые бактерии (*T. thioparus* и *T. denitrificans*). В этих условиях, соответствующих смешанной гидробиохимической зоне, получен только CuS.

Изучение минеральных форм новообразований показало, что при биогенном синтезе вышеназванных сульфидов происходит псевдоморфное замещение малахита ковеллином, церуссита — галенитом, отавита — гринокитом и т. д. Таким образом, биогенный синтез сульфидов может возникнуть на стадии как седиментогенеза и диагенеза, так и катагенеза, когда сульфатовосстанавливающие бактерии развиваются в осадке и захороненных водных растворах или когда продукты их жизнедеятельности (сероводород) привносятся циркулирующими подземными водами.

Е. З. Бурьяновой [3] рассмотрены условия образования главного минерального парагенезиса стратиформных месторождений свинца и цинка $PbS + ZnS + CaCO_3 + CaMg(CO_3)_2 + BaSO_4 + CaF_2$. Даны Eh—pH-диаграммы для главнейших соединений Pb, Zn, а также Mg, Ca и Ba.

Термодинамические расчеты Е. З. Бурьяновой позволили ей сделать следующие выводы.

В стадию седиментогенеза при накоплении известковистых илов совместно с CaCO_3 и $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ образуются тонкие взвеси BaSO_4 , PbCO_3 и отчасти ZnCO_3 . В стадию диагенеза тонкие взвеси карбонатов Pb и Zn, образовавшиеся как при стоке воды, так и при седиментогенезе в результате биогенной сульфатредукции, замещаются сульфидами (PbS и ZnS) первой генерации; образование ZnS возможно за счет растворенных ионов Zn^{2+} .

В более поздний период истории формирования пород местами происходит перераспределение свинца и цинка, а также бария, кальция и магния по тонким трещинам с образованием прожилков и жил, состоящих из жильных минералов (кальцит, доломит, барит, иногда флюорит и незначительное количество кварца) и рудных (галенит, сфалерит и другие сульфиды второй генерации).

Следовательно, в процессе формирования свинцово-цинковая минерализация, как подчеркивает Е. З. Бурьянова, первично прошла карбонатную фазу (стадия седиментогенеза) и затем сульфидную в стадию диагенеза — катагенеза. Переход PbCO_3 в PbS и ZnCO_3 в ZnS осуществляется при понижении окислительно-восстановительного потенциала, происходящего за счет жизнедеятельности сульфатовосстанавливающих бактерий. Для образования и устойчивости указанного парагенезиса благоприятна щелочная среда в узколокальной области восстановительных условий, ограниченная верхней границей полей устойчивости галенита и сфалерита. Эти физико-химические условия отражают наиболее благоприятную обстановку для развития и геохимической деятельности сульфатовосстанавливающих бактерий, т. е. анаэробную гидробиохимическую зону.

Вторичные сульфиды в осадочных толщах могут образоваться, как было указано выше, только при наличии биогенного сероводорода, который, несмотря на присутствие продуцирующих его сульфатовосстанавливающих бактерий, может в природе и не накапливаться. Это объясняется различными причинами. Главной из них является отсутствие достаточного количества источников энергии — органического вещества и сульфатов, необходимых для развития данного окислительно-восстановительного биохимического процесса. В отсутствие или при малом содержании хотя бы одного из указанных компонентов в системе вода — порода сероводород в подземных водах накапливаться не может. Так, отсутствие биогенного сероводорода в свободном и растворенном состоянии в подземных водах южной части Западно-Сибирской низменности мы объясняем отсутствием в породах гипсов и ангидридов — основных источников сульфатов в земной коре.

Важность органического вещества как фактора ограничения биологической редукции сульфатов подчеркивает австралийский ученый П. А. Трудингер [Trudinger P. A., 1976 г.]. Он приводит ряд примеров, когда сульфатовосстанавливающие бактерии в осадках остаются почти инертными из-за отсутствия усвояемого ими органического вещества.

В ряде работ, посвященных биогеохимии диагенеза осадков, уделяется большое внимание органическому веществу как «движущей силе восстановительного типа диагенеза» и указывается на то, что интенсивность диагенетических процессов — микробиологических и химических — прямо связана с органическим веществом [Биогеохимия. . ., 1976 г.].

Между $C_{\text{орг}}$ и интенсивностью сульфатредукции в большинстве случаев сохраняется прямая связь. О взаимосвязи органического вещества и интенсивности сульфатредуцирующего процесса, который проявляется в накоплении в осадках производных сероводорода ($\sum \text{SH}_2\text{S}$), указывает И. И. Волков и др. [1976 г.]. В зависимости от содержания органического вещества авторы выделяют:

1) полностью окисленные осадки, содержащие $C_{\text{орг}}$ менее 0,3—0,5 %. Процесс сульфатредукции не развивается совершенно;

2) осадки, содержащие $C_{\text{орг}}$ от 0,5 до 2—3 %. Сульфатредукция более или менее развита. В этих осадках наблюдается достаточно хорошо выраженная взаимосвязь между $C_{\text{орг}}$ и $\sum \text{SH}_2\text{S}$ с высокими значениями коэффициента корреляции;

3) сильновосстановленные осадки, содержащие выше 3 % $C_{\text{орг}}$ и, как правило, свободный сероводород. Содержание соединений восстановленной серы в таких осадках высокое, но корреляция с содержанием органического вещества либо выражена очень слабо, либо отсутствует полностью.

Нарушение корреляции между $C_{\text{орг}}$ и $\sum \text{SH}_2\text{S}$, как подчеркивают авторы, не обусловлено стабилизацией процессов восстановления сульфатов, а причинами, ограничивающими рост $\sum \text{SH}_2\text{S}$ в сильновосстановленных осадках, содержащих много органического вещества. Причиной стабилизации $\sum \text{SH}_2\text{S}$ в сильновосстановленных осадках является насыщение реакционноспособных форм железа сероводородом, о чем свидетельствует появление свободного сероводорода в осадках. Это явление носит, по мнению авторов, универсальный характер.

Отсутствие биогенного сероводорода в зоне гипергенеза может быть также вызвано широким распространением и активной жизнедеятельностью окисляющих сероводород тионовых бактерий, которые в подземных водах часто развиваются совместно с сульфатвосстанавливающими (смешанная гидробиохимическая зона). Совместное развитие микроорганизмов противоположного геохимического значения (продуцирующих и окисляющих сероводород и сульфиды) указывает на переходный характер окислительно-восстановительной обстановки, в которой образование сульфидов затруднено. Это подтверждается результатами вышеприведенных экспериментов по биогенному синтезу сульфидов из карбонатов. В III серии опытов, отвечавших условиям смешанной гидробиохимической зоны, в присутствии тионовых бактерий из карбонатов свинца, кадмия и меди был получен только ковеллин.

В зоне гипергенеза сульфидных месторождений образование вторичных сульфидов возможно только в том случае, если дея-

тельность тионовых бактерий будет подавлена, чему должно способствовать изменение существующей окислительно-восстановительной обстановки в сторону более восстановительной, неблагоприятной для жизнедеятельности названных бактерий. В связи с этим интересно отметить наблюдавшиеся нами факты образования биогенного сероводорода в пробах воды из сульфидных месторождений, после того как пробы были хорошо запечатаны и хранились в бутылках без доступа кислорода.

Значение окислительно-восстановительного потенциала и свободного кислорода для жизнедеятельности тионовых бактерий подчеркивал М. В. Иванов [18] при изучении роли микробиологических процессов в генезисе самородной серы. Он отмечал, что наибольшее число тионовых бактерий встречено в водах с высоким окислительно-восстановительным потенциалом и что «процесс окисления сероводорода до серы в контуре месторождений не происходит из-за низкой величины окислительно-восстановительного потенциала, отсутствия кислорода и слабого распространения тионовых бактерий, количество которых в водах сокращается по мере возрастания степени анаэробности подземной воды» [18, с. 292].

Рассматривая зону гипергенеза сульфидных месторождений как среду для образования биогенного сероводорода и вторичных сульфидов, необходимо также учитывать рН подземных вод, в которых протекают восстановительные биохимические процессы. В изученных нами (см. табл. 20) подземных водах (рН от 4,0 и ниже) сульфатвосстанавливающие бактерии не были обнаружены. Следовательно, в условиях кислой реакции среды биогенный сероводород, а также биогенные сульфиды из-за отсутствия сульфатвосстанавливающих бактерий образоваться не могут. При наличии кислых вод, обогащенных халькофильными элементами, они могут образовываться только на «участках встречи» [7] этих вод с водами, содержащими уже готовый биогенный сероводород.

Таким образом, для биогенного синтеза сульфидов благоприятна анаэробная гидробиохимическая зона, в которой развиваются сульфатвосстанавливающие бактерии и отсутствуют тионовые.

Анаэробная гидробиохимическая зона характерна для нефтегазоносных районов (см. гл. VI, табл. 22). Здесь в присутствии нефти, продукты разложения которой используются сульфатвосстанавливающими бактериями в качестве источника энергии, при наличии сульфат-ионов, восполняющихся за счет гипсов и ангидритов, создаются благоприятные условия для образования и накопления сероводорода, а следовательно, и для биогенного синтеза сульфидов.

Анаэробная гидробиохимическая зона, в которой содержатся такие биогенные восстановители, как сероводород и водород, должна оказывать большое влияние на металлонесные воды, поступающие из глубины по тектоническим разломам. При контакте вод, несущих металлы, с водами, содержащими вещества,

обуславливающие их восстановление и осаждение, могут образовываться различные руды. Впервые гипотезу о роли сульфатвосстанавливающих бактерий в образовании сульфидных руд высказал Е. С. Бастин [Bastin E. S., 1926 г.]. В то время эти бактерии уже были обнаружены в ряде сероводородных вод, связанных с нефтяными месторождениями. Доказательство своей гипотезы Е. С. Бастин видел в том, что многие руды штатов Миссури, Канзаса и Оклахомы ассоциируют с тяжелыми нефтями и битумами. Интересные наблюдения сделаны Е. С. Бастином на одном из месторождений Пенсильвании. Металлы из руд сульфидного месторождения, ассоциирующего с нефтяной залежью, в результате окисления переходили в раствор и выносились к флангам месторождения, где имелись сероводородные воды, содержащие сульфатредуцирующие бактерии. Под действием сероводорода металлы, перешедшие в раствор, вновь осаждались. Таким образом, происходило вторичное обогащение месторождения, на этот раз не на глубине, как обычно, а на флангах месторождения [43].

А. И. Германов [7] также указывает на связь сульфидов с нефтяными залежами. По этому поводу он пишет: «В результате изучения осадочных пород давно уже установлен парагенезис сульфидов, а также самородной серы с органическим веществом, причем значительная часть сульфидов (вкрапленных и прожилковых) является эпигенетической и возникает на тех площадях, где сульфатсодержащие подземные воды (поровые и трещинные) благодаря сульфатвосстанавливающим бактериям обогащаются сероводородом (зона углекисло-сероводородно-метановых вод). Особенно значительные эпигенетические преобразования пород и водных растворов (\rightleftharpoons) наблюдаются на площадях окисленных или интенсивно разрушающихся скоплений нефти, углеводородных газов, углей и других каустобиолитов» [7, с. 60, 61]. В некоторых районах, как отмечает А. И. Германов, над нефтяными залежами развиты озокерит, твердые битумы и другие продукты частичного окисления нефти, мигрирующие по трещинам из залежи. С этими продуктами часто ассоциируют сульфиды железа, цинка, свинца и других металлов. По мнению А. И. Германова, медистые песчаники Науката в Фергане возникли в нефтеносной геологической структуре.

Участие сульфатвосстанавливающих бактерий в формировании сульфидных руд прослежено В. П. Феоктистовым и Л. Е. Крамаренко [58] при изучении природы серой окраски пород на Джекказганском месторождении. Медное и цинково-свинцовое оруденение приурочено здесь к пестроцветным алеврито-песчаным отложениям рудоносной толщи среднего — верхнего карбона. С самого начала изучения Джекказганского месторождения было установлено, что среди пестроцветной толщи основную массу оруденения несут сероцветные разности пород, в то время как красноцветы остаются практически безрудными. Вопрос о времени и природе возникновения серой окраски рудоносных пород на месторождении является дискуссионным. Его решение весьма

актуально, так как связано с решением проблемы генезиса руд Джекказгана. На происхождение серой окраски пород в настоящее время существует несколько точек зрения, определяющихся взглядами исследователей на генезис оруденения.

Исследователи, поддерживающие гидротермальную гипотезу генезиса месторождения, считают, что серая окраска рудонесущих песчаников вторична и обусловлена метаморфизирующим действием дорудных и рудных гидротермальных растворов [Сейфулин С. Ш., Нуралин Н. Н., 1964 г.]. Странники осадочной гипотезы объясняют возникновение серой окраски пород либо восстановительной средой осадконакопления, либо обесцвечиванием первичных красноцветов при диагенезе за счет восстановления железа при разложении органического вещества [Наркелюн Л. Ф., 1962 г.]. По мнению А. И. Перельмана [1968 г.], серая окраска большей части пород джекказганской толщи вторична и обусловлена проявлением процесса оглеения красноцветов.

Детальное изучение текстурных и структурных особенностей, характера взаимоотношений между пластами различной окраски и сероцветными и красноцветными участками в пределах отдельных пластов, а также фациальных признаков пород джекказганской толщи позволило В. П. Феокистову [58] выделить среди них по природе окраски три группы (табл. 35).

I. Красноцветные песчаники, алевролиты и аргиллиты. По литологическим особенностям относятся к континентальным аллювиальным дельтовым образованиям, в меньшей степени — к мелководным прибрежно-морским. Они формировались в окислительной обстановке. Красная окраска пород связана с наличием заметных количеств гидроокислов железа в составе цемента. Особенностью красных пород является постоянное преобладание Fe_2O_3 над FeO . Содержание $C_{орг}$ в них обычно незначительное (0,02—0,07 %). Красноцветные породы, как правило, не содержат сульфидного оруденения, хотя в некоторых из них наблюдаются единичные зерна халькопирита.

II. Породы с сингенетическо-диагенетической серой окраской. По текстурным признакам относятся к отложениям замкнутых и полужамкнутых бассейнов лагунного типа с ограниченным водообменом. Содержание $C_{орг}$ в исследованных образцах 0,03—0,21 %. Эти породы часто несут вкрапленность сульфидов Fe и Cu, иногда образующую богатые рудные тела. В них же отмечаются сульфидные конкреции и псевдоморфозы сульфидов по ископаемым сульфатвосстанавливающим бактериям [Ахметов И. К., Ковшенко М. К., 1963 г.].

III. Породы с эпигенетической серой окраской. Выделяются прежде всего тем, что контуры развития серой окраски, как и оруденения, не совпадают с границами пластов определенного литологического состава по латерали, а часто и по вертикали. Серые песчаники по простиранию и падению постепенно сменяются красными. Литологические признаки свидетельствуют о том, что песчаники с эпигенетической серой окраской аллювиальные и

Результаты микробиологического исследования пород джезказганской
рудоносной толщи

Характеристика образца	C _{орг} , %	Активность сульфатовосстанавливающих бактерий	
		на среде с искусственным источником С	на среде с источником С, заключенным в породе
I. Красноцветы			
Красный алевролит с вкрапленностью халькопирита, скв. 4976, глубина 252 м	0,07	Не обн.	Не обн.
Красный алевролит, скв. 4985, глубина 205 м	0,02	„	„
II. Породы с сингенетическо-диагенетической окраской			
Зеленовато-серый мелкозернистый песчаник, скв. 4971, глубина 210 м	0,21	+++	+
Серый мелкозернистый песчаник с галенитом и пиритом, шахта 44, горизонт 270 м	0,06	+++	+++
Серый мелкозернистый песчаник с пиритом, карьер Златоуст	0,07	++	++
Зеленовато-серый алевролит, скв. 4971, глубина 391 м	0,13	+++	+
Зеленовато-серый мелкозернистый песчаник с халькопиритом, шахта 31/32, горизонт 245 м	0,03	+++	+
Серый среднезернистый песчаник с пиритом, шахта 31/32, горизонт 245 м	0,05	Не обн.	Не обн.
Серый среднезернистый песчаник с борнитом и халькопиритом, шахта 31/32, горизонт 282 м	0,01	„	„
Зеленовато-серый среднезернистый песчаник, скв. 4976, глубина 230 м	0,20	+	„
III. Породы с эпигенетической окраской			
Зеленовато-серый аргиллит из обесцвеченной верхней части пласта, шахта Покро, горизонт 260 м	0,62	Не обн.	„
Серый крупнозернистый песчаник с малахитом, месторождение Карашошак	0,02	„	„
Серый среднезернистый песчаник с борнитом и халькозинном, шахта 31/32	0,28	„	„
Красно-серый среднезернистый песчаник, шахта 31/32, горизонт 245 м	0,032	„	„
Серый крупнозернистый песчаник с халькопиритом, скв. 4976, глубина 327 м	0,18	„	„

аллювиально-дельтовые, накапливались в обстановке хорошо аэрируемой динамически активной водной среды и являются обесцвеченными аналогами вмещающих их пластов красноцветных песчаников.

Особенность химического состава сероцветных пород этого типа — пониженное по сравнению с породами описанных двух групп содержание $Fe_2O_3 + FeO$ (3,2—4,2 %). Содержание $C_{орг}$ в песчаниках 0,01—0,28 %. Цемент в них, как правило, коррозионный, глинисто-карбонатный или карбонатный. К этим песчаникам приурочена основная масса промышленного оруденения на Джекказганском месторождении. Эти данные свидетельствуют, как отмечает В. П. Феоктистов, что серая окраска пород Джекказганской рудоносной толщи обусловлена проявлением двух различных процессов.

Возникновение серой окраски в бассейнах тонкозернистых отложений (группа II) связано с существованием восстановительных условий при седиментогенезе и диагенезе вызванных генерацией H_2S при окислении органического вещества анаэробными бактериями. В этих условиях поступающее в бассейн седиментации Fe^{3+} в составе тонкодисперсных гидроокислов легко восстанавливалось, что и обусловило возникновение серой окраски.

Серая окраска большей части средне- и крупнозернистых песчаников (группа III) возникла в более поздние, чем диагенез, стадии преобразования отложений. Особенности химического и петрографического состава этих пород указывают на то, что возникновение серой окраски в них связано со значительным выносом железа и карбонатизацией пород. Именно эти процессы характерны для карбонатного оглеения [Перельман А. И., 1968 г.].

В связи с выделением различных типов пород представлялось важным выявить в них наличие и активность сульфатвосстанавливающих бактерий, что могло послужить дополнительным материалом, подтверждающим указанную точку зрения. Для этого была использована следующая методика. Образцы пород измельчали асептически, помещали в стерильную склянку и заливали средой Таусона (состав среды приведен в гл. IV, VII). Соотношение породы и среды 1/10. Посевы выдерживались в термостате в течение 2 мес.

Об активности сульфатвосстанавливающих бактерий судили по времени появления в среде H_2S . Его появление через 2 нед характеризовало высокую активность бактерий, через 1 мес — среднюю, через 2 мес — слабую.

Кроме того, исследовали возможность жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий за счет органического вещества, заключенного в породах. С этой целью производили посев пород на ту же среду Таусона, но в ее состав искусственное органическое вещество (лактат Са) не вводили. Источником энергии для сульфатвосстанавливающих бактерий служило только органическое вещество, содержащееся в породе. Соотношение породы и среды оставалось прежним.

Результаты исследований, представленные в табл. 35, показали, что из всех проанализированных образцов сульфатовосстанавливающие бактерии обнаружены только в одном типе пород — серых породах с предполагаемой сингенетическо-диагенетической окраской. Какой-либо зависимости в распределении бактерий от содержания в породах $C_{орг}$ не установлено. Это дает возможность предположить, что развитие обнаруженных нами бактерий связано с локальными особенностями геохимической обстановки, имевшей место в геологическом прошлом, а присутствующие в породах сульфатовосстанавливающие бактерии являются современными представителями поколений, принимавших участие в создании восстановительной среды при диагенезе осадков. Наличие заметных количеств сульфатовосстанавливающих бактерий в определенном типе сероцветных пород может указывать на важную роль микроорганизмов в создании восстановительной среды, в которой осуществляется перевод Fe_2O_3 в FeO в сингенетическо-диагенетическую стадию, а их отсутствие служит дополнительным подтверждением положения о ведущей роли в обесцвечивании красноцветов процесса оглеения.

В пользу высказанного предположения о принадлежности обнаруженных в породах с сингенетическо-диагенетической серой окраской микроорганизмов к потомкам древних сульфатовосстанавливающих бактерий свидетельствуют данные об устойчивости подобных микроорганизмов в условиях высоких температур и давлений и находках жизнеспособных бактерий в ископаемых геологических образованиях. При повышении давления температурный оптимум и пределы развития микроорганизмов смещаются в область более высоких температур. Развитие сульфатовосстанавливающих бактерий К. Е. Зо Белл [Zo Bell С. Е., 1958 г.] наблюдал при давлении 1000 ат и температуре $104^{\circ}C$. М. А. Мессинева [1961 г.] обнаружила в шлифах и препаратах древних пород, включая палеозойские, тела бактерий, которые при посеве на питательные среды оказались жизнеспособными. Выделенные из подземных вод глубоких горизонтов различного возраста (PZ, J) бактерии, в том числе и *Desulfovibrio desulfuricans*, часто активнее развиваются при более высоких температурах ($65-80^{\circ}C$), чем при температуре $30^{\circ}C$ (см. табл. 9, 10).

Таким образом, высокие температуры и давления не только не препятствуют жизнедеятельности бактерий, но являются естественной средой их обитания в недрах Земли. Надо полагать, что сульфатовосстанавливающие бактерии способны любое время сохраняться на участках с благоприятными условиями, являясь живыми свидетелями их участия в формировании сульфидных руд.

Выявленные особенности развития серой окраски в породах джезказганской рудоносной толщи позволяют воссоздать сложный многостадийный процесс формирования оруденения на Джезказганском месторождении и выделить два типа руд: 1) сингенетическо-диагенетические, образование которых связано с особенно-

стями седиментации осадков и диагенетическими преобразованиями в них; 2) эпигенетические, формирование которых обусловлено процессами изменения отложений при эпигенезе.

Наличие двух типов руд подтверждается и данными изотопного анализа серы, сульфидов меди и железа. По данным В. П. Феоктистова и Ю. В. Богданова (определения М. А. Голубчиной в изотопной лаборатории ВСЕГЕИ), в рудах, относимых к седиментационно-диагенетическим, изотопный состав серы 2,17—4,02 ‰ $\delta^{34}\text{S}$, в то время как в эпигенетических рудах 0,32—1,62 ‰ $\delta^{34}\text{S}$, обычно составляет около 1,0 ‰ $\delta^{34}\text{S}$.

Об участии сульфатовосстанавливающих бактерий в сульфидном рудообразовании свидетельствуют также данные Н. С. Скрипченко [1972 г.]. В оруденелом состоянии («оруденелые бактерии») они были обнаружены и изучены Н. С. Скрипченко в колчеданных рудах Блявинского, Комсомольского, Сибайского, Урупского, Худесского и других месторождений. «Оруденелые бактерии» имеют тесную парагенетическую связь с сульфидами меди, цинка, свинца. Н. С. Скрипченко предполагает, что кристаллы пирита образовались при жизни «оруденелых бактерий». Не исключено, как подчеркивает упомянутый автор, что «оруденелые бактерии» как вид микроорганизмов развиваются активно в средах с высокой концентрацией сульфатов в районах вулканической деятельности.

Влияние геохимической деятельности микроорганизмов на процессы осадочного и эпигенетического рудообразования установлено А. К. Лисицыным и Э. Г. Кузнецовой [40]. На конкретных природных объектах авторы показали роль и значение сульфатовосстанавливающих, а также водородпродуцирующих бактерий в формировании восстановительных геохимических барьеров, обуславливающих накопление различных элементов, образующих труднорастворимые соединения в низковалентном состоянии. Процесс эпигенетического рудообразования наиболее интенсивно протекает при резкой смене окислительных условий восстановительными.

В зависимости от развития водородного или сероводородного микробиологического процесса и их сочетания возникают водородный, сероводородный или водородно-сероводородный геохимические барьеры. Роль бактерий в формировании восстановительных геохимических барьеров описана в литературе [40, Перельман А. И., 1968 г.], но наши исследования показали, что наряду с формированием названных барьеров под влиянием микроорганизмов происходит их разрушение. Так, биогенное разрушение сероводородного геохимического барьера наблюдалось нами [35] при изучении экзогенного рудообразования в области выклинивания пластовой лимонитизации в центральной части одного крупного артезианского бассейна. Под влиянием щелочелюбивых видов тионовых бактерий (*T. trautweinii*, *T. denitrificans*), способных развиваться в микроаэрофильных условиях (смешанная гидробioхимическая зона), здесь происходило окисление сероводо-

рода, что создавало препятствие для развития экзогенного эпигенетического рудообразования.

Биогенное разрушение различных восстановительных геохимических барьеров — процесс, по-видимому, весьма распространенный в земной коре. Об этом свидетельствуют и наши данные, подтверждающие широкое распространение смешанной гидробиохимической зоны, в которой наряду с восстановительными процессами протекают и окислительные, причем часто последние превалируют над первыми. Выявление этих противонаправленных биогеохимических процессов представляется исключительно важным при изучении условий экзогенного рудообразования.

О ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВОДОРОДПРОДУЦИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ

Рассматриваемые бактерии не являются, как было показано в гл. II, какой-либо таксономически ограниченной группой микроорганизмов. К числу водородпродуцирующих бактерий относятся разновидности, обладающие способностью образовывать водород при анаэробном разложении органических веществ. В большинстве своем это бактерии, обуславливающие анаэробное разложение углеводов, в частности глюкозы. Эти бактерии и выделялись нами из подземных вод и вмещающих воду пород различных регионов.

Исследования показали, что водородпродуцирующие бактерии обитают в двух гидробиохимических зонах: анаэробной и смешанной. В аэробной зоне они не обнаружены. По данным А. К. Лисицына и Э. Г. Кузнецовой [40], эти бактерии распространены в некоторых артезианских бассейнах Средней Азии, в местах выклинивания пластовой лимонитизации (по нашим данным, это смешанная гидробиохимическая зона). З. И. Кузнецова [49] обнаружила водородпродуцирующие бактерии в подземных водах Грозненско-Дагестанской нефтегазоносной области, Восточной Грузии и Западной Туркмении, но они совсем отсутствовали в пробах воды, отобранных в Подмосковном и Терско-Кумском артезианских бассейнах.

Обращают на себя внимание факты нахождения рассматриваемых бактерий в водах древних отложений и в глубоких термальных водах. Так, при микробиологическом исследовании подземных вод Урупского медноколчеданного месторождения в одной из проб воды, отобранной при вскрытии глубокой скважины девонских отложений, нами выявлены в активном состоянии водородпродуцирующие бактерии. Вода газировала, в составе газа определены CH_4 , CO_2 и N_2 (биогенный) [51]. Бактерии выявлены в пробе воды, отобранной на Курильских островах (о. Итуруп, источник Горячие Ключи, $t = 55^\circ\text{C}$). Вода, в которой присутствовали названные бактерии, резко отличалась от всех остальных исследованных здесь вод своим газовым составом. Это была единственная в данном районе вода, в которой содержались

метан (57,3 %), азот (30,3 %), водород (0,3 %) [9]. Обнаруженные в ней водородпродуцирующие бактерии оказались термофилами, активно развивающимися при $t = 65^\circ\text{C}$. Вода из Чу-Сарысуйского артезианского бассейна, где были обнаружены водородпродуцирующие бактерии, относилась, по данным Г. М. Шора, к наименее промытой части бассейна и приурочена к меловым отложениям прибрежно-морского типа с наличием органического вещества углистого ряда. Кислород в этих водах отсутствовал, обнаружен сероводород (1 мг/л).

Факты, характеризующие экологию водородпродуцирующих бактерий в подземной гидросфере, увязываются с особенностями физиологии этих микроорганизмов. Известно, что рассматриваемые бактерии получают необходимую им энергию без участия кислорода при сопряженном окислении—восстановлении сбраживаемого органического вещества, когда одна часть молекулы окисляется, а другая восстанавливается. Благодаря этому бактерии способны жить и размножаться в отсутствие не только свободного, но и связанного кислорода, без которого жизнедеятельность других анаэробных бактерий невозможна. Такие особенности физиологии позволяют жить водородпродуцирующим бактериям в погребенных водах, развиваться при высоких минерализации (см. табл. 17, рассольные воды) и температурах (см. табл. 7, весьма горячие воды).

При наличии усвояемого органического вещества, в частности глюкозы, которая в природных условиях может образовываться при разложении клетчатки (см. гл. II), эти бактерии выполняют огромную геохимическую работу. В результате их жизнедеятельности формируются водородные геохимические барьеры, играющие, как было отмечено, важную роль в процессах эпигенетического рудообразования. Водородный барьер приводит к осаждению окислов урана, карбонатов железа, самородного селена. Здесь могут осаждаться также самородная медь, серебро и некоторые другие соединения [40]. На водородном геохимическом барьере не образуются сульфиды, и в этом отношении его сущность, как отмечают А. К. Лисицын и Э. Г. Кузнецова [40], близка к понятию о глеевой среде А. И. Перельмана [1959 г.].

Для образования сульфидов благоприятен сероводородный геохимический барьер, потому что, во-первых, сероводород несет в себе серу для данного геохимического барьера, во-вторых, сульфатвосстанавливающие бактерии создают более благоприятные соотношения $Eh-pH$ для восстановительного рудообразования по сравнению с водородпродуцирующими бактериями.

Геохимическая деятельность водородпродуцирующих бактерий носит как бы двойственный характер. С одной стороны, продуцируя молекулярный водород и создавая низкие окислительно-восстановительные потенциалы (Eh снижается до -500 мВ), они способствуют возникновению благоприятных условий для восстановления и осаждения рудных элементов из раствора, с другой — образуют различные органические кислоты, увеличивающие

концентрацию водородных ионов в среде до $pH = 4$ и ниже, что повышает агрессивность вод к труднорастворимым минералам и рудам и способствует сохранению ряда рудообразующих элементов в растворе. Так, в наших опытах, проводившихся совместно с Е. Е. Беляковой, Н. П. Никитиной и И. Н. Шарыхиной, водородпродуцирующие бактерии, снижавшие pH до 4,0, способствовали устойчивости в растворе золь самородного свинца, различных форм одно- и двухвалентной меди, а также свободных ионов цинка при высоких отрицательных значениях Eh (-400 мВ).

Водородпродуцирующие бактерии часто встречаются в подземных водах совместно с сульфатовосстанавливающими. В таких случаях возникают условия для образования водородно-сероводородных геохимических барьеров, имеющих универсальное значение для осаждения рудных элементов. Совместное развитие этих бактерий приводит, как показали наши исследования, к более сильному снижению Eh подземных вод. Так, в Молдавском артезианском бассейне отрицательные значения Eh подземных вод были намного выше, когда в водах наряду с сульфатовосстанавливающими бактериями развивались водородпродуцирующие (табл. 36).

Таблица 36

Влияние водородпродуцирующих и сульфатовосстанавливающих бактерий на изменение окислительно-восстановительного потенциала подземных вод Молдавского артезианского бассейна

Активность бактерий		Eh , мВ	pH	Содержание H_2S , мг/л	Минерализация воды, г/л	Глубина отбора, м	Водомещающие породы
водородпродуцирующих	сульфатовосстанавливающих						
++	+++	-275	8,4	19,5	2,1	—	Известняки, мергели (N_1)
+++	+++	-250	8,1	18,7	2,0	—	То же
+++	+++	-240	8,3	10,2	—	400	„
++	++	-230	8,5	14,45	1,27	360	„
+++	+++	-180	8,2	1,7	1,0	180	„
0	0	+10	7,4	2,55	0,8	—	Песчаники (N_2)
0	0	+50	7,8	0,35	0,6	125	Известняки (N_1)
0	++	+85	7,3	1,7	0,9	200	Песчано-глинистые отложения (N_1)
0	+++	+100	8,7	0	1,2	290	То же

Рассматриваемые бактерии активно развиваются на разных средах, содержащих глюкозу. В процессе развития они используют как нитратный, так и аммиачный азот, а калий способны добывать из руд, в которых этот элемент содержится. Представляют интерес данные о составе газов, которые образуются в результате жизнедеятельности водородпродуцирующих бактерий. Кроме водорода в культурах бактерий, выделенных нами из разных природных материалов (подземных вод и пород), определены

углекислый газ, кислород, азот, метан, высшие углеводороды, а также редкие газы. Количество этих газов в разных культурах было различное и составляло, %: H_2 8—87,1; CO_2 9—50; O_2 1—7,6; N_2 4—82,45; CH_4 0,023—1,6, высшие углеводороды — этан, пропан, изобутан и *n*-бутан соответственно до 0,05; 0,04; 0,004; 0,0013. Различные газы — H_2 , CO_2 , O_2 , CH_4 и N_2 — в опытах с водород-продуцирующими бактериями, содержащимися в подземных водах, в присутствии глюкозы выявлены З. И. Кузнецовой [49]. Количество этих газов и их соотношения так же, как и в наших опытах, были различными, что, очевидно, обуславливалось активностью бактерий, чистотой исследованных культур, условиями опытов.

Наши исследования показали, что при активном развитии водородпродуцирующих бактерий водород в среде образуется и накапливается очень быстро. В первые сутки количество водорода достигало 87,1 %, а затем начинало снижаться и увеличивалось количество CO_2 , появился азот, а в некоторых сериях опытов — метан и высшие углеводороды. Появление метана могло быть результатом биологического синтеза H_2 и CO_2 за счет жизнедеятельности проникших в среду метанобразующих бактерий.

Известно, что метанобразующие бактерии в природных условиях часто сопутствуют водородпродуцирующим, используя для своего развития продукты жизнедеятельности последних, т. е. H_2 и CO_2 . Эти продукты жизнедеятельности водородпродуцирующих бактерий способны использовать также и сульфатвосстанавливающие бактерии при автотрофном росте. Сульфатвосстанавливающие бактерии, так же как и метанобразующие, в природных условиях развиваются совместно с водородпродуцирующими. Отсюда становится понятным, почему при активном развитии бактерий, продуцирующих водород, этот газ даже в анаэробной гидробиохимической зоне в составе подземных вод не выявляется. Минимальные возможности для сохранения водорода в подземных водах создаются в смешанной гидробиохимической зоне, где наряду с анаэробными метанобразующими и сульфатвосстанавливающими бактериями развиваются аэробные, окисляющие водород (водородные) бактерии — «микроорганизмы с газовым питанием» (см. гл. II).

Водородпродуцирующим бактериям из рода *Clostridium* принадлежит важная роль в бокситообразовании, поскольку они, образуя органические кислоты, не только ускоряют выветривание материнских пород (габбро-лабрадорита), но и изменяют направленность процесса [34]. Участие названных бактерий в процессах бокситообразования установлено путем экспериментальных исследований, проводившихся на модифицированной среде Виноградского. Ее состав следующий: дистиллированная вода — 1000 мл; глюкоза — 20 г; мел — 20 г; сернокислый магний — 0,5 г; сернокислое закисное железо, сернокислый марганец и поваренная соль — следы. Кроме указанных солей в среду Виноградского добавляли в отдельных вариантах азотнокислый кальций или

азотнокислый аммоний (1 г/л). Начальное рН используемых сред 7,0—7,4. Для опытов брали крупнозернистый габбро-лабрадорит, измельченный до размера частиц меньше 0,001 мм и простерилизованный.

Опыты проводились в аэробных и анаэробных условиях с комплексом аналогичной микрофлоры, выделенной из структурного боксита и габбро-лабрадорита. Доминирующими в этом биоценозе были бактерии из рода *Clostridium*. Аэробные условия создавались в колбах, закрытых ватными пробками, через которые мог свободно проходить стерильный воздух атмосферы. Для лучшей аэрации содержимое колб периодически взбалтывали. Количество исследуемой породы 20 г. Соотношение твердой и жидкой фаз 1/10. Опыты проводили при 35—40°C; продолжительность их 8—30 сут.

В результате установлено, что выход кремнезема SiO_2 при разложении габбро-лабрадорита с участием микроорганизмов составляет от 38 до 110 мг/л. Выход SiO_2 в данном случае в 2—6 раз превышает таковой в контрольных опытах, где содержание его составляет 18—21 мг/л (табл. 37).

В наиболее продолжительных опытах (30 сут) переход SiO_2 в раствор под влиянием микроорганизмов составляет 0,175—0,213, в контрольном опыте — только 0,018—0,03 %. Переход Al_2O_3 в раствор в присутствии бактерий составил 1,0—6,7, в отсутствие — 0,3 мг/л, что превышает выход Al_2O_3 по сравнению с контрольными опытами в 3—22 раза, хотя общий вынос алюминия в раствор по сравнению с содержанием его в исходной породе очень невелик (0,004—0,028 %). Содержание Fe_2O_3 в растворе в опытах с бактериями составляло 1,5—135 мг/л, в отсутствие — 0. Деятельность микроорганизмов увеличила выход Fe_2O_3 в раствор в 1,5—135 раз (0,024—2,209 %) от первоначального содержания окислов в исходной породе. Количество калия, обнаруженного в опытах с бактериями, где этот элемент из состава среды Виноградского был исключен, составляло 100—165, в опытах без бактерий на той же среде — только 4,25 мг/л. Вынос калия в пересчете на первоначальное содержание окисла в исходной породе составил 10,0—17,0 %.

Анаэробные условия создавали в высоких цилиндрах, закрытых резиновыми пробками с отводными трубками для сбора газов. Габбро-лабрадориты (33,6 г) были залиты питательной средой того же состава и в том же соотношении, как и в предыдущих опытах. Высота столба жидкости над породой доходила до пробки и достигала 30 см. Раствор не взбалтывали, и кислород из атмосферы не поступал. Использовали тот же комплекс микроорганизмов, что и при опыте в аэробных условиях. Продолжительность опыта 30 сут.

Процесс разложения габбро-лабрадорита в присутствии микроорганизмов протекал при весьма интенсивном газообразовании, которое продолжалось в течение 30 сут. Результаты анализа газа следующие: H_2 — 87; CO_2 — 9 %; N_2 — 4 %.

Результаты биохимического разложения габбро-лабрадорита

Варианты опыта	Продолжительность опытов, сут.	рН		SiO ₂		Al ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃		K ₂ O		
		до опыта	после опыта	мг/л	% от исходной породы	мг/л	% от исходной породы	мг/л	% от исходной породы	мг/л	% от исходной породы	
Аэробные условия												
С участием бактерий из структурного боксита	30	7,0	5,6	90,0	0,175	1,0	0,0042	1,5	0,024	165	17,0	
С участием бактерий из габбро-лабрадорита	30	7,0	5,4	110,0	0,213	1,2	0,005	135	2,209	100	10,3	
Без бактерий (контроль)	30	7,4	7,4	18,0	0,03	0,3	0,001	0	0	4,25	0,438	
С участием бактерий из габбро-лабрадорита	8	7,2	6,4	40,5	0,078	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	
То же	8	7,2	5,2	56,0	0,106	"	"	"	"	"	"	
С участием бактерий из структурного боксита	8	7,2	6,4	38,4	0,073	"	"	"	"	"	"	
Без бактерий (контроль)	8	7,2	7,2	20,0	0,038	"	"	"	"	"	"	
С участием бактерий из габбро-лабрадорита	24	7,2	6,0	64,0	0,124	6,7	0,028	18,25	0,294	"	"	
То же	24	7,2	5,2	38,4	0,068	4,0	0,015	3,25	0,053	"	"	
С участием бактерий из структурного боксита	24	7,2	5,4	88,0	0,171	1,5	0,006	48	Не опр.	"	"	
Без бактерий (контроль)	24	7,2	7,0	21,0	0,04	0,35	0,001	Не опр.	"	"	"	
Анаэробные условия												
С участием бактерий из структурного боксита	30	7,2	5,6	47,6	0,092	3,38	0,014	226,5	3,828	"	"	
Без бактерий (контроль)	30	7,2	8,2	12,0	0,023	8,79	0,037	4,7	0,079	"	"	

Высокое содержание водорода в составе газа обусловило восстановительную обстановку в опыте с бактериями. Окислительно-восстановительный потенциал достигал высоких отрицательных значений ($E_h = -400$ мВ). В контрольном опыте газообразования не происходило. В опыте с бактериями рН среды понизилось с 7,2 до 5,6; без бактерий наблюдалось подщелачивание среды до рН = 8,2. Как видно из табл. 37, переход в раствор SiO_2 при разложении габбро-лабрадорита в присутствии микроорганизмов за 30 сут составил 47,6 мг/л, что превышало выход SiO_2 по сравнению с контролем почти в 4 раза (содержание SiO_2 в контрольных опытах 12 мг/л). Вынос алюминия в раствор в присутствии бактерий составил 3,38, при отсутствии — 8,79 мг/л. Переход суммарного железа с преобладанием закисного в раствор при разложении габбро-лабрадорита в присутствии микроорганизмов достиг 226 мг/л, что превысило содержание его в контрольном опыте в 48,1 раза.

Опыты, проведенные в анаэробных условиях, показали, что вынос кремнезема и железа из габбро-лабрадоритов в результате жизнедеятельности бактерий значительно возрастает, в то время как для выноса алюминия они создают неблагоприятную обстановку. Более низкое содержание алюминия в растворе в присутствии микроорганизмов по сравнению с контролем можно объяснить понижением рН среды до 5,6, происшедшим за счет разложения глюкозы. Процесс сопровождался образованием водорода, окиси углерода и простых органических кислот. В такой среде, как известно, окислы и гидроокислы алюминия обладают наименьшей растворимостью.

Таким образом, разложение габбро-лабрадорита с участием микроорганизмов протекает как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Однако направленность биогенного разложения габбро-лабрадорита в аэробных и анаэробных условиях разная (табл. 37).

Для сопоставительного расчета были использованы максимальные цифры выноса кремнезема и алюминия в течение месяца: 110 мг/л SiO_2 и 1,2 мг/л Al_2O_3 (табл. 37). Исходя из данных химического анализа в 1 см³ габбро-лабрадорита содержится 1,38 г SiO_2 и 0,62 г Al_2O_3 . В аэробных условиях при участии бактерий полный вынос (1,38 г) SiO_2 из 1 см³ габбро-лабрадорита при ежемесячном выносе 110 мг должен произойти за 12,5 мес. В контрольном опыте (без бактерий) бокситовая порода такого же качества образуется в 6,7 раза медленнее. В анаэробных условиях при участии бактерий порода может образоваться за 29,3 мес, в то время как без участия бактерий весь алюминий выносятся из породы и боксит образоваться не может (табл. 38).

Среди выделенных нами бактерий преобладали термофильные формы, способные развиваться при 35—60 °С. При более низких температурах (15—20 °С) их деятельность затормаживается. Поэтому можно предполагать, что наиболее активная геохимическая деятельность бактерий будет проявляться в условиях температурного режима тропиков.

Расчетные данные по биохимическому разложению габбро-лабрадорита
в различных условиях

Варианты опытов	Время ра- створения, мес	SiO ₂ , г	Al ₂ O ₃ , г	Кол-во Al ₂ O ₃ , оставшееся в породе, %
Аэробные условия				
С участием микроорга- низмов	12,5	1,38	0,015	97,6
Без бактерий (контроль)	76,6	1,38	0,022	96,5
Анаэробные условия				
С участием микроорга- низмов	29,3	1,38	0,096	86,6
Без бактерий (контроль)	115	1,38	1,01	60

Таким образом, в процессах миграции и аккумуляции химических (рудных) элементов участвуют разные микроорганизмы. Деятельность одних приводит к выносу рудных элементов из пород и их водной миграции, другие, наоборот, обуславливают аккумуляцию элементов в породах. С этой противонаправленной окислительно-восстановительной деятельностью связаны процессы формирования и разрушения месторождений полезных ископаемых. В процессах преобразования рудного сульфидного вещества основная роль принадлежит двум группам микроорганизмов: тионовым и сульфатовосстанавливающим.

Различные виды тионовых бактерий прямо или косвенно участвуют в окислении сульфидных минералов. В результате их деятельности водные растворы обогащаются халькофильными элементами (Cu, Pb, Zn, Mo, Cd и др.). Концентрации халькофильных элементов в водах, связанных с породами, содержащими сульфиды, в присутствии тионовых бактерий при прочих равных условиях более высокие, чем в отсутствие этих микроорганизмов. По видовому составу тионовых бактерий, обитающих в подземных водах, можно судить о степени окисленности сульфидных руд и об условиях миграции рудных элементов в системе вода—порода.

Сульфатовосстанавливающие бактерии оказывают негативное влияние на миграцию халькофильных элементов в подземных водах. Под влиянием этих бактерий, продуцирующих биогенный сероводород и снижающих окислительно-восстановительный потенциал до —400 мВ и более, халькофильные элементы в той или иной степени (Cu > As > Zn > Pb) уходят из раствора в форме сульфидов. Геохимическая деятельность тионовых и сульфатовос-

становливающих бактерий играет важную роль в процессах осадочного и эпигенетического рудообразования.

Существенную роль в преобразовании рудного вещества играют водородпродуцирующие бактерии. Эти микроорганизмы, образуя органические кислоты, увеличивающие концентрацию водородных ионов в среде и создающие низкие окислительно-восстановительные потенциалы, способствуют выносу из пород одних элементов и сохранению других. Многие вопросы о геохимической деятельности водородпродуцирующих бактерий, представляющие большой научный и практический интерес, остаются пока еще малоизученными.

Не изучались условия образования биогенного (безаргонного) азота в опытах с водородпродуцирующими бактериями, где нитраты отсутствовали, а источником азота для названных бактерий служил аммиачный азот (хлористый аммоний). В некоторых сериях этих опытов при активном развитии водородпродуцирующих бактерий количество N_2 достигало 82,45 %. Экспериментальные данные подтверждаются данными о накоплении азота в природной обстановке. Так, при исследовании газового состава глубоких подземных вод на Урупском медноколчеданном месторождении оказалось, что наибольшее количество безаргонного азота (79 %) установлено в пробе воды, где присутствовали водородпродуцирующие бактерии [51].

Особенно важными нам представляются вопросы, касающиеся влияния рассматриваемых микроорганизмов на поведение химических элементов в связи с процессами рудообразования, а также возможности их использования в качестве поисковых критериев на некоторые руды. Предпосылкой к этому служат наши данные о характере распределения и высокой активности водородпродуцирующих бактерий в водах ряда рудоносных площадей.

ВЛИЯНИЕ МИКРООРГАНИЗМОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Присутствие микроорганизмов в подземных водах, высокое их содержание (до нескольких миллионов клеток в 1 мл воды), способность жить в широких температурных пределах (от 0 до 98°C), при разной степени минерализации подземных вод (от 0,01 до 300 г/л), разных значениях pH (от 0,64 до 11) обязывают нас рассматривать бактерии как составную часть подземных вод и считаться с микробиологическими процессами как с фактором, способным влиять на формирование их химического состава.

Формирование химического состава подземных вод происходит при участии аэробной, факультативно-анаэробной и анаэробной микрофлоры. Эти микроорганизмы в процессе своей жизнедеятельности потребляют вещества пород и подземных вод и создают новые. Тем самым они оказывают влияние на формирование химического состава подземных вод. Развивающиеся в системе вода—порода виды и группы бактерий характеризуются не только разным отношением к внешним акцепторам электронов (свободному и связанному кислороду), но и к окисляемому органическому и минеральному веществу, которое служит донатором электронов и водорода в окислительно-восстановительных биохимических реакциях. Это определяет специфику бактерий и особенности биохимических реакций, протекающих в системе вода—порода.

Так, например, метанокисляющие бактерии, использующие в качестве донатора электронов CH_4 , обнаружены нами только в тех подземных водах южной части Западно-Сибирской низменности, где присутствовал метан, и не развивались в азотных водах (табл. 39). Для азотных вод этого региона характерны денитрифицирующие бактерии (гетеротрофы и миксотрофы). Активное развитие этих бактерий в исследованных нами водах согласуется с повышенным содержанием в них азота.

В грунтовых гидрокарбонатных натриевых водах Западной Сибири, характеризующихся повышенным содержанием органического вещества (окисляемость до 4,48 мг/л O_2), наряду с тионовыми, сульфатвосстанавливающими, денитрифицирующими и другими бактериями выявлены азотофиксирующие бактерии типа *Clostridium pasterianum*. В культуре этих бактерий, развивающихся на безазотистой среде Виноградского, в атмосфере азота образовано до 17 % водорода и до 54 % CO_2 .

Наблюдается взаимосвязь между количеством *Clostridium pasterianum* в подземных водах и содержанием CO_2 , образованного в присутствии этого микроорганизма на указанной среде (рис. 4).

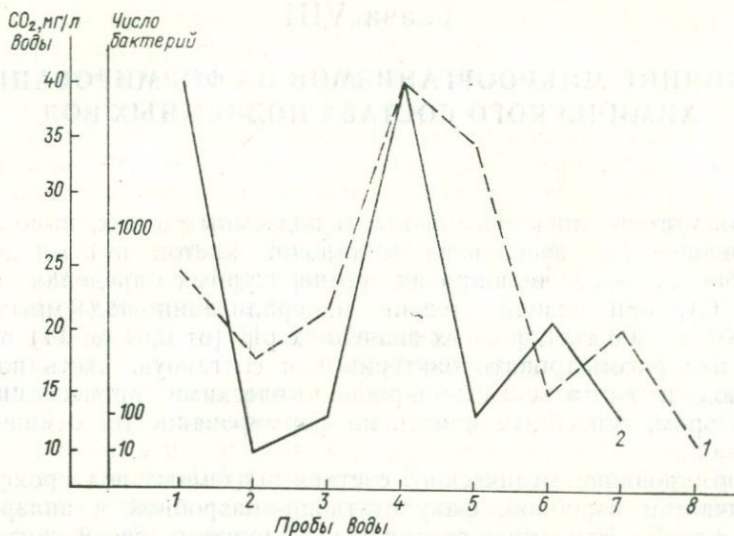


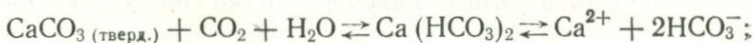
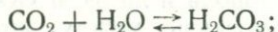
Рис. 4. Зависимость между содержанием CO₂ на среде с глюкозой (1) и количеством бактерий *Clostridium pasterianum* (2) в подземных водах.

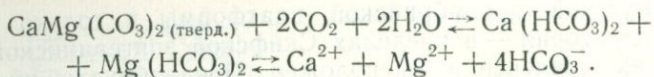
Таблица 39

Распространение метанокисляющих и денитрифицирующих бактерий в некоторых подземных водах Западной Сибири в зависимости от содержания в них метана и азота

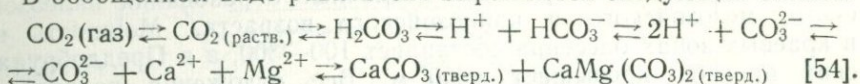
Скважина	Интервал опробования, м	Содержание в составе свободного газа, об. %		Активность бактерий	
		CH ₄	N ₂	метанокисляющих	денитрифицирующих
Омская 1-Р	2700—2708	71,6	24,3	++++	0
	2525—2518	88,5	4,8	++++	0
	2425—2430	83,8	14,0	++++	0
	1887—1878	96,5	3,3	++	0
Купино	Гл. 1000	0,3	96,2	0	++
Баган	Гл. 1100	0,2	99,5	0	++++
Карасук	Гл. 1074	0,1	99,1	0	++++

Углекислый газ является продуктом жизнедеятельности многих микроорганизмов, участвующих в аэробном и анаэробном распаде органического вещества, и имеет важное геохимическое значение, так как определяет карбонатное равновесие природных вод. При участии CO₂ осуществляются следующие реакции:





В обобщенном виде равновесие выражается следующей схемой:



Из приведенных равенств следует, что с карбонатным равновесием, центральным звеном в котором является CO_2 , связано поведение в природных водах ионов HCO_3^- , CO_3^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также различных металлов (Fe, Sr, Cu, Pb, Zn и др.), которые в присутствии CO_2 образуют карбонатные соли разной степени подвижности [54].

Большую роль в процессах преобразования химического состава подземных вод играют сульфатвосстанавливающие бактерии. Деятельность этих микроорганизмов, как отмечалось выше (гл. II и VII), тесно связана с наличием органического вещества и сульфатов. В присутствии этих источников энергии в системе вода—порода протекают сопряженные окислительно-восстановительные процессы, сопровождающиеся окислением органического вещества и восстановлением сульфатов. При этом сульфаты могут быть полностью восстановлены до сульфидов или свободного сероводорода.

В этой связи представляют интерес данные С. В. Егорова и М. Н. Авчинниковой [1978 г.], полученные при изучении условий образования сероводорода в подземных водах северо-западной части Русской платформы (Прибалтийский, Московский, Северо-Двинский артезианские бассейны). В результате исследований установлено, что образование сероводородных вод в указанных бассейнах связано с наличием гипсоносных и огипсованных пород девонского, каменноугольного и пермского возраста, за счет выщелачивания которых в подземные воды поступают сульфаты (внешние акцепторы электронов). Органическое же вещество поступает с верховых болот или водовмещающих пород разного возраста. Активные формы сульфатвосстанавливающих бактерий обнаружены нами в подземных водах кембрийских отложений Ленинградской области.

Жизнедеятельность сульфатвосстанавливающих бактерий оказывает большое влияние на химический состав подземных вод, что связано с выведением сульфатов из состава подземных вод и заменой их гидрокарбонатами. На примере Молдавского артезианского бассейна, микрофлора которого изучалась нами совместно с сотрудниками кафедры гидрогеологии Ленинградского государственного университета, можно видеть, как микроорганизмы закономерно (зонально) распределяются в подземных водах и влияют на их химический состав [47]. Молдавский артезианский бассейн относится к числу бассейнов второго порядка. Он входит в состав Причерноморского артезианского бассейна первого порядка. Изучаемая часть бассейна находится в пределах юго-западного

склона Русской докембрийской платформы и только крайняя южная территория — в пределах Скифской эпигерцидской плиты. В зоне их сочленения расположен Предобруджский прогиб. В пределах бассейна развиты осадочные образования палеозойского, мезозойского и кайнозойского возраста. Мощность их в краевых зонах бассейна составляет 100—300, а в Предобруджском прогибе превышает 5000 м. Все отложения водоносны. Поскольку из числа исследованных водоносных горизонтов Молдавского артезианского бассейна наиболее полно изучена микрофлора вод нижнего сармата, в дальнейшем выявленные закономерности будут касаться только этих отложений.

В 30 пробах воды из этих отложений выявлены следующие физиологические группы микроорганизмов: сульфатвосстанавливающие, денитрифицирующие (гетеротрофы), разлагающие белковые вещества (растущие на МПА) и водородпродуцирующие. Для выделения гидробиохимических зон использовалась только одна группа микроорганизмов — сульфатвосстанавливающие бактерии, широко распространенные в водах Молдавского артезианского бассейна. Их распространение подчиняется определенным закономерностям, которые отчетливо устанавливаются при сопоставлении активности названных бактерий и содержания в водах сероводорода, являющегося продуктом их жизнедеятельности.

На основе изучения закономерностей распространения сульфатвосстанавливающих бактерий в водах (и содержания в них сероводорода) для исследуемой территории составлена карта (рис. 5), на которой выделены четыре гидробиохимические зоны: аэробная, смешанная, анаэробная и отсутствия бактерий (зона, в которой выявляемые нами бактерии не обнаружены).

Аэробная гидробиохимическая зона, характеризующаяся отсутствием сульфатвосстанавливающих бактерий, выделена на севере и востоке исследуемой территории. Породы нижнего сармата прикрыты здесь главным образом отложениями среднего сармата. Водовмещающие породы представлены в основном известняками, реже мергелями. Эта зона приурочена к водоносному горизонту, залегающему на глубинах до нескольких десятков метров. Воды горизонта либо безнапорные, либо имеют небольшие напоры (преимущественно до 20 м). Свободные и растворенные газы зоны преимущественно азотные, содержание свободного кислорода достигает 19, углекислоты — 6—10 %. Отношение He/Ar в газах колеблется от 0,002 до 0,006. В редких случаях в водах выявлен сероводород в незначительных количествах (до 0,3 мг/л), хотя в этой зоне сульфатвосстанавливающие бактерии не обнаружены. Минерализация вод изменяется от 0,5 до 2,5, преобладает от 0,5 до 1,5 г/л. Воды гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-сульфатные, преимущественно смешанного катионного состава.

Содержание иона SO_4 чаще всего составляет 20—30 %-экв. Окислительно-восстановительный потенциал в аэробной зоне в основном положительный — до +135 мВ. Данные газового состава, значения pH и Eh подземных вод, совпадение террито-

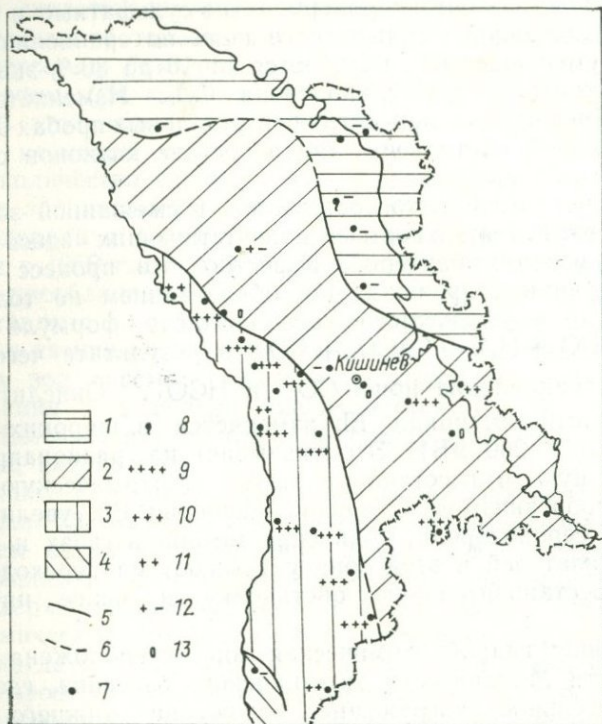


Рис. 5. Карта гидробиохимических зон нижнесарматского водоносного горизонта.

1—4 — зоны: 1 — аэробная, 2 — смешанная, 3 — анаэробная (активный рост бактерий), 4 — анаэробная (бактерии отсутствуют); 5, 6 — границы зон: 5 — установленные, 6 — предполагаемые; 7 — скважина; 8 — родник; 9—13 — активность сульфатредуцирующих бактерий; 9 — весьма интенсивная, 10 — интенсивная, 11 — умеренная, 12 — слабая, 13 — отсутствует. Граница между аэробной и смешанной зонами в северной части откорректирована по гидродинамическим данным (в связи с отсутствием микробиологических данных).

при распространения аэробной зоны с областью питания подземных вод отражают окислительную обстановку их формирования в условиях свободного водообмена.

По мере погружения нижнесарматского водоносного горизонта в западном и юго-западном направлении от первых десятков метров до 250—290 м в водах начинают появляться сульфатовосстанавливающие бактерии и аэробная зона, по-видимому, сменяется смешанной.

По преобладающим газам воды смешанной зоны остаются азотными, но в ряде проб появляется метан — до 10%. Содержание кислорода уменьшается по сравнению с аэробной зоной, но в отдельных пробах достигает 7%. Отношение He/Ar в газах колеблется от 0,006 до 0,16.

По химическому составу воды рассматриваемой зоны отличаются от вод аэробной. Минерализация колеблется от 0,5 до 3,0 г/л. В восточной и южной частях зоны преобладают воды с минерализацией до 1,5, в западной — 1,5—3,0 г/л. По преобла-

дающим анионам воды гидрокарбонатно-сульфатные и гидрокарбонатные. Содержание сульфатного иона по сравнению с аэробной зоной уменьшается и колеблется от 10 до 30 %-экв. В водах зоны содержится 3—15 %-экв. иона CO_3 . Изменяется состав катионов. Превалирует ион натрия (в отдельных пробах 99 %-экв.), кроме восточной части зоны, где в составе катионов существенную роль играет магний.

Изменение химического состава вод в смешанной зоне увязывается с жизнедеятельностью присутствующих здесь сульфатвосстанавливающих бактерий. Известно, что процесс биогенной сульфатредукции сопровождается образованием не только сероводорода, но и углекислого газа согласно формуле $\text{CaSO}_4 + 2\text{C}_{\text{орг}} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2$, в результате чего в водах происходит накопление ионов CO_3^{2-} и HCO_3^- . Окислительно-восстановительный потенциал E_h изменяется в широких пределах (от +115 до —200 мВ). Это указывает на разнонаправленную (окислительную и восстановительную) геохимическую деятельность микроорганизмов. Снижение значения E_h , увеличение рН, количества сероводорода, появление метана в газах и изменение других показателей в этой зоне указывают на переходную окислительно-восстановительную обстановку и менее интенсивный водообмен.

Анаэробная гидробиохимическая зона расположена в юго-западной части Молдавского артезианского бассейна, где происходит значительное погружение отложений нижнего сармата. Глубина вскрытия водоносных горизонтов увеличивается до 350 м. Воды напорные, максимальный напор 300 м. Для этой зоны характерно активное развитие сульфатвосстанавливающих бактерий в водах всех исследованных скважин. Количество сероводорода в водах отдельных скважин достигает 58 и даже 95 мг/л. Газовый состав вод характеризуется тем, что наряду с азотными имеются азотно-метановые, метаново-азотные, а в юго-западной части газы с содержанием метана до 93 %. Увеличивается отношение He/Ar в газах от 0,16 до 0,448, что указывает на изолированность водоносных горизонтов нижнего сармата в этой части бассейна от поверхности земли. С увеличением содержания сероводорода увеличивается общая минерализация вод, составляющая в среднем 2—8, а в отдельных пробах на юго-западной границе зоны достигающая 5—7 г/л. При этом изменяется анионный состав воды. Количество сульфатов резко уменьшается, снижаясь на севере до 10—11, а на юге до 1 %-экв. и менее. На второе место в составе анионов выходит ион хлора, достигая 20—30 % от суммы анионов, а на юге ион хлора выходит на первое место. В составе катионов преобладает ион натрия (72—90 %-экв.).

Окислительно-восстановительный потенциал в водах анаэробной зоны всегда отрицательный (от —200 до —280 мВ).

Низкие значения E_h , метановый состав газов, высокие отношения He/Ar , значительные содержания сероводорода и прочие

показатели свидетельствуют о наличии здесь восстановительной гидрохимической обстановки и замедленном водообмене.

Зона отсутствия бактерий выделена условно по данным только одной скважины (28, г. Кагул), опробованной трижды (1966, 1967, 1969 г.). В этой зоне, характеризующейся также анаэробными условиями, несмотря на отсутствие сульфатовосстанавливающих бактерий, количество сероводорода в водах довольно велико, но подвержено значительным колебаниям во времени. Так, содержание сероводорода в водах указанной скважины в 1967 г. составляло 102, а в 1969 г. снизилось до 37,4 мг/л. В составе растворенных газов преобладает CH_4 . Содержание N_2 снижается до 4 %, а CO_2 составляет 5—6 %. Отношение He/Ar в газах 0,204. Минерализация и химический состав вод в этой зоне резко отличаются от таковых вод рассмотренных выше гидробиохимических зон. Минерализация вод сильно увеличивается (до 68 г/л; анализ 1966 г.). Изменяется и химический состав вод. Они становятся хлоридными, натриевыми.

Отсутствие сульфатовосстанавливающих бактерий в воде, вскрытой скв. 28, может быть объяснено весьма незначительным содержанием сульфатов (внешних акцепторов электронов), без которых жизнедеятельность этих бактерий невозможна. Значительное содержание сероводорода в водах связано либо с прошлой геохимической деятельностью сульфатовосстанавливающих бактерий, когда ион SO_4 еще присутствовал, а затем был израсходован в процессе биогенной сульфатредукции, либо с привносом сероводорода из других горизонтов. Общая гидрохимическая характеристика и газовый состав при отсутствии микроорганизмов подтверждают наличие здесь зоны весьма замедленного водообмена.

В связи с оценкой генезиса сероводорода существенно важным представляется приведенный выше факт уменьшения его содержания во времени, что говорит в пользу нашего первого предположения. Если бы сероводород поступал из других горизонтов, его количество оставалось бы стабильным. В данном же случае при отсутствии биохимической деятельности микроорганизмов сероводород расходуется, но запасы его не пополняются.

Другие микроорганизмы, выявленные нами наряду с сульфатовосстанавливающими бактериями, также закономерно (в соответствии с физиологическими свойствами) распределяются в водах Молдавского артезианского бассейна. Факультативно-анаэробные денитрифицирующие бактерии и бактерии, растущие на белковых средах, использующие в качестве внешних акцепторов электронов как свободный, так и связанный кислород, распространены во всех трех гидробиохимических зонах: аэробной, смешанной и анаэробной.

Анаэробные водородпродуцирующие бактерии, не нуждающиеся ни в свободном, ни в связанном кислороде (они развиваются за счет брожения органического вещества), распространены только в анаэробной гидробиохимической зоне. Жизнедеятельность

тельность водородпродуцирующих бактерий приводит к снижению окислительно-восстановительного потенциала. В подземных водах Молдавского артезианского бассейна, где наряду с сульфатвосстанавливающими развиты и водородпродуцирующие бактерии, показатели E_h самые низкие (-275 мВ, см. табл. 35).

В условиях эксперимента водородпродуцирующие бактерии, по нашим данным, снижают E_h среды до -500 мВ.

Поскольку выявлявшиеся нами микроорганизмы — гетеротрофы, требующие для своего развития органического вещества, мы сопоставили их деятельность с содержанием последнего (выраженным в окисляемости) в водах различных гидробиохимических зон. Оказалось, что окисляемость в аэробной и смешанной гидробиохимических зонах значительно ниже (в среднем соответственно 3 и 6 мг/л O_2), чем в анаэробной (в среднем 15 мг/л O_2). Возможно, в первых двух, где способны развиваться аэробные микроорганизмы, расход органического вещества протекает более интенсивно, чем в анаэробной зоне, где эти бактерии не развиваются. Тем не менее количество его в этой зоне, судя по окисляемости, не убывает, а, наоборот, увеличивается. Можно предположить, что органическое вещество в анаэробную зону поступает не только из областей питания, но и из органических веществ пород нижнего сармата, так как именно к этой зоне, в которой наиболее глубоко залегают сарматские отложения, приурочены более интенсивные битумопроявления. Высокое содержание органического вещества в водах зоны отсутствия бактерий (скв. 28, глубина 460 м, окисляемость 61 мг/л O_2) может быть связано с поступлением органического вещества из более глубоких горизонтов, так как скв. 28 расположена в зоне разлома.

Из приведенных данных видно, что при смене гидробиохимических зон происходит последовательное изменение ионного и газового состава подземных вод (табл. 40). Гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-сульфатные, разные по катионам воды, свойственные аэробной гидробиохимической зоне (сульфатвосстанавливающие бактерии в этой зоне не развиваются), в смешанной и анаэробной зонах, где проявляют свою деятельность сульфатвосстанавливающие бактерии, становятся бессульфатными гидрокарбонатными натриевыми и гидрокарбонатно-хлоридными натриевыми.

Наиболее ярко выражено влияние бактерий на химический состав подземных вод в тех случаях, когда вещества, вступающие в окислительно-восстановительные биохимические реакции, находятся в избытке. Такие благоприятные для жизнедеятельности микроорганизмов условия чаще всего создаются в подземных водах, связанных с месторождениями полезных ископаемых (нефть, рудные месторождения). Так, образование N_2 , NH_4 , CO_2 , H_2S наблюдалось нами главным образом в водах артезианских бассейнов нефтегазоносных областей: Волго-Камском, Бухаро-Каршинском, Сурхан-Дарьинском и др., где в биохимические

Формирование химического состава подземных вод под влиянием сульфатовосстанавливающих бактерий на примере Молдавского артезианского бассейна

Гидробиохимическая зона	Активность бактерий	Минерализация воды, г/л	Химический состав воды		Ен, мВ
			ионный	газовый	
Аэробная	0	0,5—1,5	Гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-сульфатный, разный по катионам	N ₂	+ 135
Смешанная	++	До 3,0	Гидрокарбонатный натриевый	H ₂ S до 10 мг/л	- 200
Анаэробная	+++	До 7,0	Гидрокарбонатно-хлоридный натриевый	H ₂ S до 95 мг/л	- 280
Отсутствия бактерий	0	До 68,2	Хлоридный натриевый	H ₂ S до 37,4 мг/л	- 300

окислительно-восстановительные реакции в качестве доноров электронов и водорода вовлекается нефть (см. гл. VI).

Продукты жизнедеятельности микроорганизмов, в частности сероводород, не были обнаружены, например, в южной части Западно-Сибирского артезианского бассейна, где нефти нет, а сульфаты находятся в минимальных количествах.

Результаты микробиологических и гидрохимических исследований, проводившихся нами совместно с Е. Е. Беляковой в нефтегазоносных районах Советского Союза (Волго-Уральская нефтеносная область, Средняя Азия и др.), а также данные других исследователей показали, что залежи нефти и газа в ореоле их влияния создают благоприятные условия для жизнедеятельности не только сульфатовосстанавливающих бактерий, но и других физиологических групп микроорганизмов. В подземных водах нефтяных месторождений обнаружены водородпродуцирующие, метанобразующие, денитрифицирующие, тионовые бактерии, окисляющие метан и его высшие гомологи.

Все эти микроорганизмы оказывают большое влияние на химический и газовый состав подземных вод. На примере исследования подземных вод Самаро-Камского междуречья Волго-Уральской нефтеносной области установлено [2, 24], что геохимическая деятельность микроорганизмов в нефтяных месторождениях и их влияние на химический состав подземных вод в различных горизонтах протекают по-разному. Это связано с историей этих горизонтов [2]. Отдельные горизонты геологического разреза по-разному подвергались воздействию внешних факторов, и структуры, с ними связанные, были неодинаково закрыты.

Проанализировав палеогидрогеологические условия и их изменение в ходе геологического развития территории, Е. Е. Белякова [2] выделила три группы горизонтов, характеризующихся сход-

Гидробиохимические показатели нефтегазоносного

Группа вод (по Е. Е. Беляковой)	Гидробиохимическая зона (по Л. Е. Крамаренко)	NH ₄ , мг/л	H ₂ S, мг/л	Состав растворенных в водах	
				CO ₂	H ₂ S
Первая	Отсутствия бактерий	34,8—1000,4	0—405	0,1—15,4	0,1—39,2
Вторая	Анаэробная (развиваются анаэробные бактерии)	3,2—105,5	419—1500	0,2—25,7	0,8—35,4
Третья	Смешанная (развиваются анаэробные и аэробные бактерии)	0—45	1,3—4200	0,7—64,3	1,0—13,9

ными гидрогеологическими условиями формирования химического состава вод. Этим группам горизонтов соответствуют по характеру гидрогеологической обстановки три типа структур в современном структурном плане.

Первая группа. Подземные воды горизонтов, продолжительно не подвергавшихся воздействию внешних факторов (хорошо и продолжительное время закрытые структуры). К ним относятся отложения девона, турнейского яруса и нижеартинского подъяруса, хорошо закрытые структуры верхнепермских отложений. В водах этих отложений, характеризующихся высокой минерализацией (до 277 г/л), бактерии в настоящее время не развиваются, но продукты их жизнедеятельности есть, что свидетельствует о бывших биогеохимических процессах (табл. 41). Так, во всех исследованных водах этой группы обнаружен биогенный (безаргонный) азот, содержание которого достигает 93 об. % (пашийская свита верхнего девона). Сохранился здесь в значительных количествах и аммоний, до 1000 мг/л (та же пашийская свита). Сероводород — этот продукт жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий, легко вступающий в различные химиче-

района Самаро-Камского междуречья

газов, об. % (по данным Е. Е. Беляковой)				Формула Курлова (примеры)
CH ₄	Высшие углеводороды	N ₂		
		общий	биогенный	
19,7—73,8	1,3—39,2	3,4—59,1	44,7—93,4	M ₂₇₇ $\frac{Cl50}{Na30Ca12}$;
				M ₂₄₈ $\frac{Cl50}{Na31Ca13Mg6}$;
				M ₁₆₇ $\frac{Cl49}{Na48}$
7,6—69,8	4,7—43,8	6,1—76,8	59,2—88,3	M ₁₁₆ $\frac{Cl47SO_43}{Na46}$
4,0—60,8	0,1—21,8	18—98,9	0—89,1	M ₄₇ $\frac{Cl36SO_413}{Na44}$;
				M ₃ $\frac{Cl24SO_420HCO_36}{Na33Ca12}$;
				M ₄ $\frac{HCO_339SO_48}{Mg22Ca20Na9}$;
				M _{0,4} $\frac{HCO_348}{Ca26Mg22}$

ские реакции, в большинстве исследованных вод этой группы не сохранился. Но в некоторых водах (кунгурский и артинский ярусы нижней перми, калиновская свита казанского яруса верхней перми) присутствие H₂S также зафиксировано (до 405 мг/л). Пластовые воды терригенных отложений этой группы обычно обогащены растворенным железом, которое связывает сероводород. В породах девона присутствуют вторичные кристаллы пирита. По наблюдениям Е. П. Розановой и С. И. Кузнецова [52], пирит часто встречается в кернах яснополянской терригенной толщи.

Для вод этой группы характерно то, что их минерализация, содержания брома, а также сульфатов по мере удаления от контура нефтегазоносности не меняются. Это свидетельствует об отсутствии химического преобразования вод без бактерий, т. е. химический состав вод стабилизирован. Первая группа вод, в которой в настоящее время биохимические процессы не протекают, соответствует четвертой вышеописанной нами гидробиохимической зоне, благоприятной для сохранения полезных ископаемых (см. гл. VI).

Вторая группа. Подземные воды горизонтов, подвергавшихся воздействию внешних факторов (полузакрытые структуры). К ним относятся отложения башкирского яруса среднего карбона, верхнеартинского подъяруса и кунгурского яруса нижней перми и др. В водах этой группы с минерализацией 74—162 г/л обнаруживаются активные формы анаэробных сульфатовосстанавливающих бактерий. Аэробные бактерии здесь не выявлены. Жизнедеятельность сульфатовосстанавливающих бактерий в этих водах сопровождается образованием сероводорода, количество которого варьирует от 419 до 1500 мг/л (табл. 41).

Вторая группа вод характеризует третью, анаэробную, гидробиохимическую зону, в которой развиты только восстановительные биохимические процессы (см. гл. VI). Разрушение нефтяной залежи здесь происходит под влиянием анаэробной микрофлоры.

Третья группа. Подземные воды, подвергавшиеся в недалеком прошлом и подвергающиеся в настоящее время воздействию внешних факторов (полузакрытые и открытые структуры). К ним относятся калиновская и уфимская свиты верхней перми, верхнеартинский подъярус и кунгурский ярус нижней перми. В подземных водах этих структур обитают анаэробные (сульфатовосстанавливающие), факультативные (денитрифицирующие) и аэробные (окисляющие углеводороды) бактерии.

Третья группа вод отражает смешанную гидробиохимическую зону, где протекают как окислительные, так и восстановительные биохимические процессы. Разрушение нефтяной залежи в этой группе вод протекает более интенсивно, чем во второй, так как здесь действуют не только анаэробные, но и аэробные микроорганизмы. Геохимическая деятельность микроорганизмов сопровождается (рис. 6, табл. 41) уменьшением содержания высших углеводородов, метана, аммония и повышением углекислого газа. Количество H_2S изменяется в широких пределах, что может быть объяснено разнонаправленностью протекающих здесь биохимических процессов, которые, с одной стороны, обуславливают образование сероводорода, а с другой — способствуют его окислению. Накопление сероводорода в этой группе вод происходит в тех случаях, когда восстановительные биохимические процессы преобладают над окислительными. При обратном соотношении этих процессов сероводород в водах не накапливается.

Химический состав воды в рассматриваемых группах изменяется следующим образом.

Воды первой группы, где бактерии не развиваются (зона отсутствия бактерий), высокоминерализованные, хлоридные натриевые или магниево-кальциево-натриевые, второй группы, где развиваются только анаэробные бактерии (анаэробная гидробиохимическая зона), чаще всего сульфатно-хлоридные натриевые. Воды третьей группы, где развиваются как аэробные, так и анаэробные бактерии (смешанная гидробиохимическая зона), характеризуются большим разнообразием. Здесь встречаются сульфатно-хлоридные,

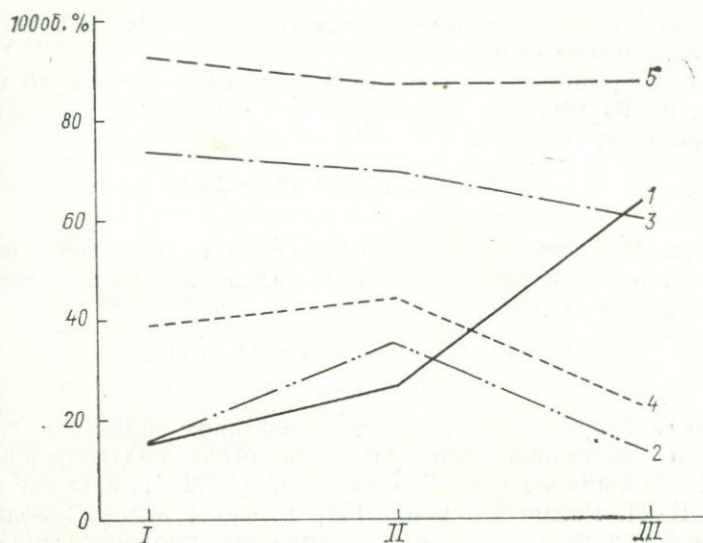


Рис. 6. Изменение газового состава в группах I—III подземных вод, выделенных в районе Самаро-Камского междуречья (по данным Е. Е. Беляковой).

1 — CO₂; 2 — H₂S; 3 — CH₄; 4 — высшие углеводороды; 5 — N₂ (биогеенный).

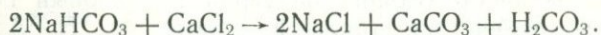
гидрокарбонатно-хлоридные, сульфатно-гидрокарбонатные и карбонатные, разные по катионам воды (табл. 41).

Среди биоценоза бактерий, свойственного подземным водам нефтяных месторождений, наиболее ярко проявляется геохимическая деятельность сульфатвосстанавливающих бактерий.

Последовательность процесса формирования химического состава подземных вод под влиянием сульфатвосстанавливающих бактерий, развивающихся в нефтяных месторождениях, описана в литературе [Кузнецов С. И., Иванов М. В., Ляликова Н. Н., 1962 г.; 52]. Сульфаты натрия в процессе биогенной сульфат-редукции восстанавливаются до сульфидов, при этом образуется бикарбонат натрия:



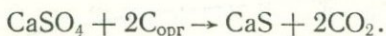
Бикарбонаты натрия взаимодействуют со щелочноземельными солями сильных кислот. При этом карбонаты кальция и магния выпадают из вод и обогащают породы, а хлориды натрия накапливаются в воде:



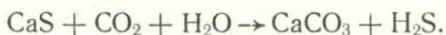
Воды из сульфатно-хлоридных кальциевых превращаются в гидрокарбонатно-хлоридные натриевые. В случае хлоридных магниевых вод, содержащих хлориды натрия и магния и сульфаты магния и кальция, в процессе редукции сульфатов последние

в виде карбонатов и магнезия выпадают из раствора и воды становятся хлоридными натриевыми.

Если пластовые воды богаты сульфатами кальция, то использование их бактериями в процессе редукции протекает согласно следующему уравнению:



При этом CaS, реагируя с более сильной угольной кислотой, может выпадать в виде вторичного кальцита, который запечатывает нефтяную залежь:



Выпадение вторичного кальцита в нефтяном пласте в процессе биогенного восстановления сульфатов было подтверждено опытами К. Б. Аширова и И. В. Сазоновой [1962 г.], а также наблюдалось Е. П. Розановой и др. [52] в искусственно заводняемом нефтяном пласте, где активно развивались продуцирующие сероводород сульфатовосстанавливающие бактерии.

В результате бактериального восстановления сульфатов в зависимости от характера вод и вмещающих пород из сульфатных вод могут образовываться хлоридные, гидрокарбонатные натриевые и гидрокарбонатные кальциевые воды [Кузнецов С. И., Иванов М. В., Ляликова Н. Н., 1962 г.].

В нефтяных месторождениях, где источником энергии для бактериальной деятельности служит нефть, наряду с сульфатовосстанавливающими бактериями развиваются метанобразующие. В процессе анаэробного разложения нефти последние обогащают подземные воды метаном. Биогенная природа метана в подземных водах подтверждается результатами анализа изотопного состава углерода, обогащенного легким изотопом [62].

В опытах В. А. Экзерцева [1960 г.], которые проводились на минеральной среде Баркера в присутствии нефти, было образовано, об. %: CH_4 — до 35; CO_2 — до 4,9; N_2 — до 76,5. В одном из вариантов опытов образовался также водород (5 об. %). Состав газа, полученный В. А. Экзерцевым, близок составу газа, растворенного в пластовых водах ряда нефтяных месторождений. Из накопительных культур бактерий, развивавшихся на среде Баркера с нефтью, В. А. Экзерцев выделил чистые культуры метанобразующих бактерий (*Methanococcus mazei* и др.) и несколько видов *Bacillus*.

Влияние метанобразующих бактерий на газовый состав пластовой воды отмечается также в работе М. Е. Альтовского, Е. Л. Быковой, З. И. Кузнецовой и В. М. Швеца [49]. По данным этих авторов, увеличение интенсивности развития метанобразующих бактерий коррелирует с повышенным содержанием метана в воде восходящих источников в области разгрузки нефтяных пластов в районе Копетдага (Западная Туркмения).

Геохимическая деятельность микроорганизмов, обитающих в подземных водах нефтяных месторождений, приводит к преобразованию нефтей. Процессы преобразования нефтей микроорганизмами изучались Т. Л. Симаковой с соавторами [50], Е. П. Розановой и С. И. Кузнецовым [52] и другими. Т. Л. Симакова с соавторами [50] показали, что изменение нефти под влиянием микроорганизмов происходит как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Но в последних оно выражено слабо. Эти авторы подчеркивают, что в преобразовании нефтей принимают участие не отдельные группы, а весь комплекс микроорганизмов, обитающих в подземных водах и породах нефтяных месторождений. Сюда входят представители родов *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Desulfovibrio* и др.

При разрушении нефти окисляются углеводороды легкой фракции, главным образом метановые, за счет чего возрастает содержание ароматических и нафтеновых углеводородов. Общая схема комплексного превращения нефтей при участии биологических, химических и физико-химических факторов, по мнению Е. П. Розановой и С. М. Кузнецова [52], должна выглядеть следующим образом: метаново-нафтеновая малосернистая малосмолистая нефть → нафтеново-ароматическая сернистая смолистая нефть → разнообразные вариации асфальтов.

Биогенный фактор влияет на формирование химического состава подземных вод и в тех случаях, когда в энергетический обмен микроорганизмов включаются сульфиды тяжелых металлов. Главную роль в процессах формирования химического состава подземных вод, связанных с сульфидным оруденением, играют тионовые бактерии, широко распространенные в подземных водах сульфидных месторождений. Определенным образом на этот процесс влияют сульфатовосстанавливающие бактерии, также часто встречающиеся в подземных водах сульфидных месторождений.

Изменение химического состава подземных вод горноскладчатых областей прослежено нами на медноколчеданных месторождениях Западного Саяна, Кавказа, Среднего Урала (табл. 42). Исследования показали, что химический состав подземных вод этих месторождений изменяется в зависимости от состава населяющих воды бактерий, который отражает две характерные для горноскладчатых областей гидробиохимические зоны: смешанную и аэробную.

В смешанной зоне, где совместно развиваются тионовые и сульфатовосстанавливающие бактерии, обуславливающие развитие разнонаправленных окислительно-восстановительных процессов, подземные воды либо хлоридно-гидрокарбонатные натриевые (Кавказ), либо гидрокарбонатно-сульфатные магниевые-кальциевые (Западный Саян).

Для аэробной гидробиохимической зоны, в пределах которой выделяются две подзоны, характерны либо сульфатные (I подзона), либо гидрокарбонатно-сульфатные (II подзона), разные по

Формирование химического состава подземных вод в горноскладчатых местах

Гидробиохимическая зона	Подзона	Микроорганизмы	Активность	Минерализация воды, г/л
Западный				
Смешанная	—	<i>T. ferrooxidans</i>	+	0,3
		<i>T. thiooxidans</i>	+++	
Аэробная	—	<i>T. thioparus</i>	++	4,7
		<i>T. trautweinii</i>	+++	
		<i>T. denitrificans</i>	+++	
		Сульфатвосстанавливающие	+++	
		<i>T. ferrooxidans</i>	+++	
Кав				
Смешанная	—	<i>T. thioparus</i> Сульфатвосстанавливающие	++++ ++++	0,17
Аэробная	II	<i>T. ferrooxidans</i>	+	0,23
		<i>T. thiooxidans</i>	+++	
Аэробная	I	<i>T. denitrificans</i>	+++	0,3
		<i>T. ferrooxidans</i>	++	
		<i>T. thiooxidans</i>	+	
Средний				
Аэробная	II	<i>T. ferrooxidans</i>	+	0,5—2,6
		<i>T. thiooxidans</i>	+	
Аэробная	I	<i>T. denitrificans</i>	+++	32—51
		<i>T. ferrooxidans</i>	+++	
		<i>T. thiooxidans</i>	+++	

Таблица 42

областях под влиянием микроорганизмов на примере медноколчеданных рождений

pH	Ионный состав воды	Металлы в водах (концентрация, мг/л)	$rSO_4 + rCl + rNO_3 + rNO_2$
			$rHCO_3 + rCO_3$ (по Е. Е. Беляковой)
Саян			
6,6	Гидрокарбонатно-сульфатный магниевый-кальциевый	Cu (1,35) Zn (0,45) Fe (45,0)	1,0
2,6	Сульфатный кальциевый-магниевый	Cu (135) Zn (0,06) Fe (0,06) Al (0,103)	∞
каз			
8,0	Хлоридно-гидрокарбонатный калиево-натриевый	Cu (0,0017) Pb (0,0017) Mn (0,0017)	3,0
6,0	Гидрокарбонатно-сульфатный магниевый-кальциевый	Cu (0,004) Zn (1,610) Pb (0,0048) Ni (0,016) Co (0,01) Mn (0,61)	1,6
4,0	Сульфатный кальциевый-магниевый	Cu (2,70) Zn (2,70) Pb (0,99) Ni (0,09) Co (0,039) Mn (0,87)	+
Урал			
6,3—7,1	Гидрокарбонатно-сульфатный кальциевый	Fe (0,79—2,14) Cu (0,21—0,78)	4,6
1,88—2,95	Сульфатный, смешанный по катионам	Fe (385—5473) Cu (326—5135) Zn (326—5135) Pb (0,51—5,1)	∞

катионам воды. Для подземных вод подзоны I характерно активное развитие кислотолюбивых и кислотоустойчивых видов *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans*. В результате их жизнедеятельности воды становятся кислыми (рН от 4,0 до 1,88). В водах подзоны II названные бактерии менее активны. Значения рН = 7,1 ÷ 6,0.

По составу и активности тионовых бактерий, обитающих в подземных водах, связанных с сульфидными месторождениями, можно судить о стадийности процесса преобразования их химического состава в сторону сульфатности. Сульфатными становятся воды, в которых активно развиваются аэробные кислотолюбивые и кислотоустойчивые *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans*.

Стадийность данного процесса увязывается с коэффициентами r , характеризующими отношение анионов сильных кислот к анионам слабых (табл. 42). В сульфатных водах этот коэффициент равен бесконечности.

Вместе с изменением ионного состава вод в сторону их сульфатности усиливаются вынос рудных элементов из пород и переход их в подземные воды. На участках структур, где находятся рудные месторождения, наблюдается тесная взаимосвязь между активностью тионовых бактерий и максимальными концентрациями не только халькофильных (Cu, Zn, Pb, Fe, Mo и др.), но и нехалькофильных (Mn, K, F и др.) элементов в природных водах (см. гл. VII). Формирование химического состава подземных вод под влиянием микроорганизмов детально прослежено Н. М. Прокофьевой и Л. Е. Крамаренко [51] на Урупском медноколчеданном месторождении.

Рудовмещающая толща этого месторождения представлена метаморфизованными вулканогенно-осадочными образованиями девона. На дневной поверхности отложения обнажаются в виде небольшого эрозионного «окна» в долине р. Уруп, которая пересекает месторождение в центральной его части. На большей же части месторождения они перекрываются песчано-глинистыми сланцами нижней юры и погружены на значительную глубину ниже эрозионного вреза реки. В процессе разведочных работ установлено, что юрские образования играют роль водо- и газо- непроницаемого экрана для девонских отложений.

В связи с такими условиями залегания в рудовмещающей толще четко фиксируются две гидродинамические зоны и соответствующие им гидрохимические.

Нижняя зона (затрудненного водообмена) развита наиболее широко. В этой зоне залегают напорные воды повышенной минерализации (около 15 г/л). По химическому составу они хлоридные натриевые, практически бессульфатные, газующие главным образом метаном и азотом. Эти воды, по данным Н. М. Прокофьевой [1964 г.], скорее всего являются погребенными водами морского генезиса.

Верхняя зона (свободного водообмена) развита весьма ограничено. Она распространена только в северной части месторождения, где рудовмещающие отложения обнажены и залегают

выше эрозионного вреза реки. Подземные воды в этой зоне формируются за счет инфильтрационных вод. По химическому составу они гидрокарбонатные, реже сульфатно-гидрокарбонатные, различного катионного состава. Минерализация вод не превышает 1 г/л. На отдельных участках месторождения, преимущественно под долиной реки, формируются воды разнообразного химического состава. Именно эти воды чаще всего поступают в горные выработки. Они и были подвергнуты микробиологическому анализу.

Преимущественно глубокое залегание колчеданных рудных тел, слабый водообмен в рудовмещающей толще, обусловленный геолого-структурными и гидрогеологическими особенностями, и практическое отсутствие свободного кислорода в инфильтрационных водах, связанное с обилием лесов и травянистой растительности, явились причиной того, что на Урупском месторождении до вскрытия его горными выработками процессы окисления протекали слабо. Горные выработки заметно активизировали эти процессы. Интенсивность их проявления оказалась разной на различных участках месторождения. На одних участках, где горные работы еще не производились, продолжает сохраняться резко восстановительная обстановка ($E_h = -210 \div -240$ мВ). Здесь господствуют хлоридные натриевые воды высокой минерализации. Эти воды, как уже отмечалось, характерны для зоны затрудненного водообмена. В таких водах В. Л. Мехтиевой и А. И. Фридманом [1961 г.] обнаружены анаэробные сульфатвосстанавливающие и метанобразующие, а также факультативно-анаэробные тионовые бактерии (*T. denitrificans*), т. е. микроорганизмы, характеризующие анаэробную гидробиохимическую зону, в которой протекают только восстановительные биохимические процессы.

Последовательность изменения химического состава подземных вод под влиянием микроорганизмов на Урупском месторождении прослежена по ряду водопроявлений (табл. 43). Так, в наименее измененном виде хлоридные натриевые воды, характерные для глубоких горизонтов, отмечены по водопроявлению 36 (проба 2). Биоценоз бактерий, населяющих эту воду, может вызвать развитие как окислительных, так и восстановительных биохимических процессов. В зависимости от интенсивности этих противоположно направленных процессов химический тип воды в этой зоне может быть весьма разнообразным. На рассматриваемом участке месторождения восстановительные процессы преобладают над окислительными, вследствие чего сохраняется первоначальный тип воды. Водопроявление 36 (проба 2) сопровождается резким запахом H_2S .

Воды, вскрытые горными выработками под долиной реки (водопроявления 2, проба 9, и 55, проба 5), имеют более низкую минерализацию и несколько повышенную сульфатность. В этих водах окислительные биохимические процессы начинают преобладать над восстановительными. Об этом свидетельствует изменившийся

Изменение химического состава подземных вод в зависимости от состава и активности микроорганизмов на Урупском месторождении

Номер водопроведения Номер пробы	Микроорганизмы							Формула Курлова	pH
	Аэробные				Факультативные <i>T. denitrificans</i> (образовано NO_2^- , мг/л)	Анаэробные			
	<i>T. ferrooxidans</i> (образовано Fe^{3+} , мг/л)	<i>T. thiooxidans</i> (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, %)	<i>T. thioparus</i> (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, %)	<i>T. trautweinii</i> (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, %)		сульфат-восстанавливающие	водород-продуцирующие		
36/2	0	100	100	0	150	+++	+++	$M_{4,32} \frac{\text{Cl}9\text{HCO}_39}{\text{Na}95\text{Ca}3\text{Mg}2}$	7,6
2/9	1,5	100	75	100	До N_2	+++	0	$M_{0,95} \frac{\text{SO}_455\text{HCO}_330\text{Cl}15}{\text{Na}78\text{Ca}20\text{Mg}2}$	7,2
55/5	2,0	100	100	100	До N_2	0	0	$M_{0,74} \frac{\text{SO}_440\text{Cl}32\text{HCO}_318}{\text{Na}91\text{Ca}9}$	7,1
18/8	3,0	100	100	44	75	0	0	$M_{0,96} \frac{\text{SO}_468\text{HCO}_326\text{Cl}16}{\text{Ca}60\text{Na}20\text{Mg}20}$	6,8
7/11	22,5	0	0	0	0	0	0	$M_{7,5} \frac{\text{SO}_499\text{HCO}_31}{\text{Na}72\text{Ca}26\text{Fe}1\text{NH}_41}$	5,6

состав бактерий. Анаэробные водородпродуцирующие бактерии исчезают (проба 9), нет и сульфатовосстанавливающих (проба 5), появляется аэробный, но малоактивный вид *T. ferrooxidans*. В соответствии с этим изменяется и химический состав воды. Хлоридная натриевая вода сменяется гидрокарбон-сульфатной натривой. На других участках месторождения хлоридные воды, поднимаясь по тектоническим трещинам к верхним горизонтам, более значительно смешиваются с инфильтрационными.

Количественные соотношения между этими водами на разных участках различны. Это сказывается как на химическом составе подземных вод и характере окислительно-восстановительной обстановки (значения Eh подземных вод, поступающих в горные выработки, колеблются от -107 до $+744$ мВ), так и на составе содержащихся здесь бактерий. По мере повышения Eh из состава вод постепенно исчезают микроорганизмы, свойственные анаэробной гидробиохимической зоне (водородпродуцирующие и сульфатовосстанавливающие бактерии), менее активным становится факультативный *T. denitrificans*, активными остаются аэробные *T. thiooxidans* и *T. thioparus*, несколько активизируется *T. ferrooxidans* (табл. 43, водопроявление 18, проба 8).

Изменение химического состава подземных вод под влиянием данного биоценоза заключается в увеличении в них абсолютного и относительного содержания сульфатных ионов и в небольшом снижении pH. Значительные изменения химического состава вод на сульфидных месторождениях связаны, как уже отмечалось, с активным развитием микроорганизма *T. ferrooxidans*, который играет ведущую роль в окислении сульфидов.

На Урупском месторождении *T. ferrooxidans* в активном состоянии обнаружен в водах на участке, расположенном на небольшой глубине (20—90 м) под руслом и пойменной частью реки, там, где по сильнотрещиноватой тектонической зоне поверхностные воды и воды аллювиальных отложений могут проникать в рудоносную толщу. Здесь (табл. 43, водопроявление 7, проба 11) под влиянием активного *T. ferrooxidans* (образовано в среде 22,5 мг/л Fe^{3+} из Fe^{2+}) образуется сульфатная вода с высоким содержанием железа, высокой минерализацией и низким значением pH.

В настоящее время *T. ferrooxidans*, играющий ведущую роль в окислении сульфидов, хотя и присутствует в подземных водах верхних горизонтов Урупского месторождения почти повсеместно, активность его, однако, еще невелика. При дальнейшей эксплуатации месторождения произойдет усиление интенсивности водообмена в рудовмещающих породах. Это должно привести к увеличению активности *T. ferrooxidans*, а следовательно, к усилению окислительных процессов, которые будут сопровождаться увеличением концентрации сульфат-иона в водах, понижением pH, а также выносом металлов из руд.

Воды глубоких горизонтов, не затронутых влиянием горных выработок, на Урупском месторождении не претерпевают изме-

нений, связанных с окислением сульфидных руд. Под влиянием анаэробных микроорганизмов — сульфатвосстанавливающих, водородпродуцирующих и факультативных денитрификаторов — воды глубоких горизонтов обогащаются сероводородом, биогенным азотом. Присутствие в составе газов, растворенных в хлоридных натриевых водах Урупского района в значительных концентрациях (25—79 %), безаргонного (биохимического) азота, по-видимому, связано также с широким распространением и высокой активностью денитрифицирующих, окисляющих серу бактерий. Однако вопрос об источниках энергии для развития этих бактерий в исследуемом районе пока не ясен.

Геохимическая деятельность сульфатвосстанавливающих бактерий сопровождается уменьшением содержания в водах ионов SO_4^{2-} , повышением содержания HCO_3^- и некоторым увеличением рН. Жизнедеятельность водородпродуцирующих бактерий не привела к накоплению водорода в исследованных водах, что связано, по-видимому, со способностью водорода активно вступать в химические реакции или быть использованным в качестве источника энергии другими микроорганизмами.

В процессах биогенного преобразования химического состава подземных вод сульфидных месторождений принимают участие не только вышеописанные нами бактерии, но и многие другие, распространенные в водах микроорганизмы. Так, исследования В. М. Пантелеева с соавторами [53] показали, что в кислых рудничных водах медноколчеданных месторождений Урала развиты гетеротрофные бактерии *T. organoparus*, впервые выявленные Г. Е. Маркосяном [62]. В нейтральных водах зон цементации и вмещающих пород распространены углеводородокисляющие бактерии.

В формировании химического состава подземных вод различных рудных месторождений могут играть роль микроорганизмы, выделенные и изученные Н. Н. Ляликовой (Медведевой): *Leptospirillum ferrooxidans*, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*, *T. thio-parus* subsp. *antimoniticum*, *Stibiobacter senarmontii* и др., а также нитрифицирующие бактерии [Медведева Н. Н., 1980 г.]. Нитрифицирующие бактерии разной активности выявлены нами в аэробной и смешанной гидробиохимических зонах Ленинградской области, Западной и Восточной Сибири в основном до глубины 1000 м.

Таким образом, микроорганизмы оказывают заметное влияние на формирование химического (ионного и газового) состава подземных вод. Наиболее ярко это выражено в подземных водах, связанных с месторождениями нефти и различных руд, где источники энергии (вещества, вступающие в окислительно-восстановительные реакции) находятся в избытке.

На нефтяных месторождениях при биогенном окислении нефтей происходит накопление газов: сероводорода, углекислоты, метана, азота. Изменяется при этом и ионный состав подземных вод, что

обусловлено характером выявляемых здесь гидробиохимических зон. При переходе смешанной гидробиохимической зоны к анаэробной, а затем к зоне отсутствия бактерий, т. е. в сторону восстановительной среды, химический состав изменяется от гидрокарбонатно-сульфатного к хлоридно-сульфатному, а затем к хлоридному.

На рудных (сульфидных) месторождениях при переходе смешанной гидробиохимической зоны к аэробной, т. е. в сторону окислительной среды, химический состав изменяется от хлоридно-гидрокарбонатного к гидрокарбонатному, а затем к сульфатному.

ЗНАЧЕНИЕ МИКРООРГАНИЗМОВ ДЛЯ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Существование тесной связи между микроорганизмами и источниками энергии (донаторами и внешними акцепторами электронов), заключенными в системе вода—порода, обуславливает не только зональное распределение микроорганизмов в данной системе, но и их специфику. Специфика микроорганизмов, т. е. их различное отношение к донаторам электронов (окисляемым органическим и минеральным веществам), служит основой для использования микроорганизмов в поисковых целях.

К настоящему времени определились два микробиологических метода поисков месторождений: нефти и газа и сульфидных руд.

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОИСКОВ НЕФТИ И ГАЗА

Впервые этот метод для поисков нефти и газа предложен и обоснован Г. А. Могилевским [6]. Работы на заведомо нефтеносных и газоносных площадях показали, что в осадочной толще пород наблюдается активная деятельность микроорганизмов, существующих за счет использования газов миграционного потока. В зависимости от качественного состава поступающих газов эти микроорганизмы представлены специфическими видами, окисляющими или только метан, или этан и пропан, или другие более тяжелые углеводороды. По наличию этих групп бактерий в анализируемых образцах судят о газонефтеносности данного района.

Существует несколько разновидностей микробиологического метода поисков нефти и газа. В зависимости от того, ведутся ли поиски окисляющих углеводороды микроорганизмов в водах или в породах, применяется грунтовая или водная микробиологическая съемка. Если на содержание углеводородокисляющих бактерий исследуется глубинный разрез осадочных толщ, а также подземные водоносные горизонты, возникает третья разновидность бактериальных изысканий — биокаротаж.

В настоящее время наиболее широко применяется водная микробиологическая съемка, обычно проводимая в комплексе с газовыми и гидрохимическими исследованиями подземных вод. Объектами опробования при этом являются родники, колодцы, скважины.

Преимущество водной микробиологической съемки как рекогносцировочного метода заключается прежде всего в том, что водоносные горизонты встречают поток мигрирующих углеводородов на большей глубине по сравнению с грунтовой съемкой. Водоносные горизонты как бы контролируют на данном участке поток мигрирующих углеводородов на его пути к дневной поверхности. Индикаторной микрофлорой на нефть и газ при проведении водных микробиологических исследований являются бактерии: окисляющие метан, окисляющие пропан, развивающиеся в атмо-

сфере одного из парообразных углеводов — пентана, гексана и гептана.

Конечная задача микробиологических изысканий на нефть и газ заключается в том, чтобы, во-первых, выявить на площади съемки или по разрезу исследуемых скважин участки с аномальными значениями углеводородных показателей и, во-вторых, определить возможную связь этих аномалий с промышленными залежами нефти и газа.

В результате обработки фактических данных могут быть выделены:

а) очажковая аномалия, когда индикаторные микроорганизмы обнаруживаются в отдельных разрозненных точках, но группируются в пределах определенного участка, для которого может быть дана общая граница распространения данного индикаторного организма;

б) сплошная аномалия, когда индикаторные организмы в пределах выделенного участка обнаруживаются во всех обследованных точках при достаточной интенсивности развития.

При проведении водной микробиологической съемки выявленные аномалии могут быть представлены всеми вышеперечисленными индикаторными микроорганизмами, которые могут находиться в различных соотношениях друг с другом.

Для вод, связанных с нефтяными и газовыми месторождениями, но содержащих значительные концентрации сероводорода, указанные выше бактериальные индикаторы, как подчеркивает Г. А. Могилевский, применяться не могут. В этих случаях в качестве индикатора используются сульфатвосстанавливающие бактерии, развивающиеся в лабораторных условиях на среде с гептаном, который для них является источником углерода [6].

При поисках специфических признаков у бактерий в связи с разработкой комплексного гидрогеологического метода прогноза нефтегазоносности [2, 24] мы также обратили внимание на выявление способности сульфатвосстанавливающих бактерий, содержащихся в подземных водах нефтегазоносных и заведомо не-нефтегазоносных районов, развиваться в накопительных культурах, т. е. в присутствии сопутствующих бактерий, за счет высших углеводов [24].

Исследования, проведенные с сульфатвосстанавливающими бактериями, выделенными в накопительную культуру из подземных вод, заведомо связанных и не связанных с нефтяными залежами (соответственно Второе Баку и кембрийские отложения Ленинградской области), показали, что эти микроорганизмы по-разному относятся к использованию нефтяных углеводов в качестве источников энергии.

Способностью развиваться на нефтяных индивидуальных углеводородах, в частности на нонане C_9H_{20} , обладали разновидности, обитающие только в водах нефтяных месторождений, и не обладали этой способностью бактерии из вод, не связанных с нефтью. Бактерии из вод, связанных с нефтяными залежами (скв. Со-

сновка 10, Байтуган 91), образовали за счет отложения C_9H_{20} соответственно 74 и 112 мг/л H_2S в течение 3-месячной инкубации (табл. 44).

Таблица 44

Количество сероводорода, образованного сульфатвосстанавливающими бактериями, выделенными из подземных вод нефтегазоносных районов и разведочных площадей за счет разложения нефтяных углеводородов (C_9H_{20})

Скважина	Интервал опробования, м	Кол-во H_2S за 3 мес, мг/л
Западная Сибирь		
Утешево 4-Р	1231—1247	27
Луговская 1-Р	1050—1048	43
Тюмень 1-Р	1003—1009	15
Покровка 1-Р	871—863	65
Омская 1-Р	3001,5—2830	66
Березово 1-Р	758—740	17
То же	860—864	36
„	882—878	23
„	1212—1233	18
„	1292—1295	19
„	1292—1317	24
Березово 4-Р	1264—1268	117,7
Второе Баку		
Сосновка 10	—	74
Байтуган 91	—	112

Сульфатвосстанавливающие бактерии из вод разведочных площадей Западной Сибири также по-разному относились к использованию нефтяных углеводородов. Так, бактерии, выделенные из щелочных гидрокарбонатных натриевых вод южной части Западной Сибири (скв. Баган, Карасук, Купино, Кулунда, Татарская и др.), где нефть не обнаружена, не развивались на средах, где единственным источником энергии служили нефтяные углеводороды. Способностью к росту на нефтяных углеводородах обладали бактерии из вод северной части Западно-Сибирской низменности. В частности, такие бактерии выделены из вод отдельных горизонтов, вскрытых скв. Утешево, Луговская, Тюмень, Покровка, Омская (табл. 44). Количество сероводорода, образованного в течение 3-месячной инкубации названными бактериями за счет разложения C_9H_{20} , колебалось от 15 до 66 мг/л. Исключение составили бактерии, выделенные из вод, а точнее из конденсата вода—нефть, вскрытого скв. Березово 4-Р, расположенной в Тюменской области. Под влиянием этих бактерий образовалось 117,7 мг/л H_2S за тот же срок инкубации.

Особенности сульфатовосстанавливающих бактерий, содержащихся в исследованном конденсате, описаны в гл. V. Напомним, что это были термофильные бактерии, активно развивающиеся при температуре 80 °С. Морфологически они представляли собой мелкие палочки, отличавшиеся исключительно большой подвижностью. При культивировании при 30 °С утрачивали свою подвижность и погибали, что свидетельствовало о неблагоприятных температурных условиях для их развития.

Наряду с сульфатовосстанавливающими в исследованном конденсате вода—нефть из скв. Березово 4-Р содержались и другие бактерии: денитрифицирующие, окисляющие высшие углеводороды в аэробных условиях, маслянокислого брожения, а также тионовые. Последние, так же как и сульфатовосстанавливающие бактерии, оказались термофилами (см. гл. V). Этот биоценоз, состоящий из аэробных, факультативных и анаэробных бактерий, очевидно, и был ответствен за процесс разложения нефти в данных природных условиях.

Сульфатовосстанавливающие бактерии, населяющие подземные воды нефтегазоносных районов (Второе Баку), способны в накопительных культурах развиваться за счет высших жидких углеводородов (C_9H_{20}). Это позволило нам рекомендовать в комплексе гидрогеологических показателей нефтегазоносности включить и микробиологический показатель — наличие в подземных водах сульфатовосстанавливающих бактерий, способных развиваться на средах, содержащих не только пареообразные, но и жидкие углеводороды, в частности нонан [24].

За рубежом (в США) существует ряд патентов на микробиологические методы поисков нефти и газа, в которых содержатся данные о методах грунтовой бактериосъемки и микробиологическом изучении глубоких подземных вод [Голубович В. Н., 1966 г.].

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОИСКОВ СУЛЬФИДНЫХ РУД

Комплексные опытно-методические исследования при разработке гидрогеохимического метода поисков рудных месторождений обусловили возникновение микробиологического метода [8]. Детальные микробиологические исследования различных по характеру водообмена систем (вода—порода—живое вещество), заведомо связанных и не связанных с оруденением, позволили установить ряд закономерностей в распределении и активности микроорганизмов, способных служить поисковым целям. Прямая зависимость распределения и активности отдельных видов и ассоциаций тионовых бактерий в породах и подземных водах от наличия или отсутствия оруденения в земной коре позволяет рассматривать микробиологический метод как один из важных методов поисков рудных полезных ископаемых.

Гидробиохимическая зональность земной коры, характеризующая закономерное по мере погружения водоносных горизонтов

изменение состава микрофлоры, обуславливает особенности микробиологических поисковых ассоциаций (биоценозов) в различных по характеру водообмена системах (см. гл. VI). Изучение распределения поисковых микроорганизмов в системе вода—порода используется для оценки перспективности исследуемых территорий, а также для уточнения положения рудных тел в районах с известным сульфидным оруденением.

Некоторые виды бактерий, развивающиеся при отсутствии молекулярного кислорода или при малом его содержании, проникают по трещинам и тектоническим разломам в глубь рудонесных пород, участвуют в процессах окисления сульфидных руд и могут указывать на наличие сульфидного оруденения, скрытого на глубине. Часто отдельные виды тионовых бактерий являются единственным признаком месторождений и рудопроявлений, открытых чехлом рыхлых отложений.

Значение микроорганизмов для поисков сульфидных руд рассматривается в двух аспектах: во-первых, микроорганизмы могут использоваться как индикаторы природы геохимических полей распределения рудных элементов в водах и породах; во-вторых, они могут быть поисковыми признаками сульфидных руд.

Как было показано выше, тионовые бактерии, прямо или косвенно участвуя в окислении сульфидных руд, способствуют образованию окисных форм халькофильных элементов и миграции последних. Сульфатвосстанавливающие бактерии, наоборот, обуславливают выпадение халькофильных элементов из водных растворов. Таким образом, бактерии участвуют в формировании гидро- и литохимических аномалий.

Существует определенная связь между активностью тионовых бактерий и концентрацией рудных элементов, характеризующих аномалии, ореолы рассеяния рудных месторождений, водные ореолы рассеянной минерализации и фон. Рудные месторождения, воды которых заселены активными тионовыми бактериями (Западное, Южное и Батыстау), более обогащены элементами главных рудообразующих минералов. Воды месторождений, в которых бактерии развиты слабо (Кок-Забой, Каратас), характеризуются более низкими концентрациями некоторых рудных элементов (например, меди).

Зависимость между активностью тионовых бактерий и металлоносностью вод наблюдается в разных по минеральному составу сульфидных месторождениях. На редкометалльных месторождениях такую зависимость наиболее ярко отражают *T. thiooxidans* и *T. denitrificans*, на медноколчеданных — *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans*.

В гл. VII отмечалось, что по видовому составу тионовых бактерий, населяющих сульфидные месторождения, можно судить о степени окисленности руд. Степень биогенной окисленности сульфидных руд раскрывает одну из важных сторон формирования аномалий и водных ореолов рассеяния элементов, используемых в качестве основных критериев при поисках руд гидрогеохи-

мическим методом. Тесно увязанная с концентрациями металлов в подземных водах, она свидетельствует о том, что при глубоком окислении руд, которое осуществляется комплексом кислотолюбивых и кислотоустойчивых видов *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans*, могут быть образованы наиболее высокие концентрации металлов в подземных водах. В начальных же стадиях окисления сульфидов, когда комплекс микроорганизмов, представленный видами *T. denitrificans*, *T. trautweinii* и *T. thioparus*, не обеспечивает глубокого окисления сульфидных минералов, высокие концентрации металлов не образуются. Поэтому гидрохимические аномалии и водные ореолы рассеяния рудных элементов, несмотря на существующую связь подземных вод с сульфидным оруденением, могут не выявляться или быть малоконтрастными.

Малоконтрастные гидрохимические аномалии и водные ореолы рассеяния рудных элементов могут формироваться на месторождениях, перекрытых чехлом рыхлых отложений, в условиях, неблагоприятных для жизнедеятельности аэробных видов тионовых бактерий. В этих условиях при затрудненном водообмене активно развиваются сульфатвосстанавливающие бактерии. Деятельность продуцирующих сероводород сульфатвосстанавливающих бактерий приводит к образованию и выпадению из природных растворов вторичных сульфидов металлов, которые накапливаются в донных осадках. Восстановительная среда создается часто в водосточниках (озерах, родниковых воронках). В таких условиях содержания ряда халькофильных элементов в водах могут быть угнетенными, а в донных осадках — аномально высокими [8].

Угнетенные гидрохимические аномалии фиксируются на многих месторождениях Казахстана. На месторождениях, где сульфатвосстанавливающие бактерии активны, часто отмечаются незначительные содержания свинца и меди. Медь наиболее подвержена воздействию сульфатвосстанавливающих бактерий. Так, на месторождении Каратас в водах скважин, вскрывших рудоносные скарны, при одинаковых значениях рН (6,2—6,6), при которых медь устойчива в воде (случай активного развития сульфатвосстанавливающих бактерий), концентрации ее не достигают кларка гидросферы. При отсутствии или слабом развитии бактерий содержание меди превышает кларковые значения. В водах месторождения Западного, где условия в целом благоприятны для водной миграции молибдена, наряду с тионовыми содержатся и сульфатвосстанавливающие бактерии, появляются также очаги вод с угнетенными содержаниями этого элемента. Аналогичная картина наблюдается в водах, вскрытых скважинами в рудном теле месторождения Южного (рН = 7,1). При наличии сульфатвосстанавливающих бактерий содержания молибдена только среднеаномальные (ореол рассеяния рудного вещества), при их отсутствии — максимально аномальные.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что микроорганизмы активно участвуют в формировании различных гидрогео-

Типы районов, характеризующиеся разными условиями формирования

Тип района (пример)	рН вод	Число проб	<i>T. ferrooxidans</i>		<i>T. thiooxidans</i>	
			Встречае- мость, %	Активность (образовано Fe^{3+} , мг/л)	Встречае- мость, %	Активность (окислено $Na_2S_2O_3$, %)
1-й (Удоканский)	5,8—7,9 чаще 7,0	13	54	1,3	46	36
2-й (Джезказган- ский)	7,0—7,7	10	0	0	70	69

химических аномалий и могут быть использованы для определения их природы. По раздельному и совместному нахождению тионовых и сульфатвосстанавливающих бактерий выделяются два типа районов, которые характеризуются разными физико-химическими, географическими, климатическими и гидрогеологическими условиями, определяющими развитие данных микроорганизмов (табл. 45). Направленность окислительно-восстановительных процессов, а следовательно, и природа геохимических полей находятся в прямой зависимости от вышеназванных бактерий.

Для 1-го типа районов, приуроченных к высокогорным областям, характерны только окислительные биохимические процессы. В водах Удоканского района тионовые бактерии малоактивны вследствие распространения многолетней мерзлоты, а также особенностей динамики природных вод (активный водообмен). Здесь обнаруживаются в основном два вида: *T. ferrooxidans* (встречаемость 54 %) и *T. thiooxidans* (46 %). Сульфатвосстанавливающие бактерии на месторождении не развиваются (сульфат-ион в водах отсутствует), поэтому биогенный фактор в образовании литохимических и угнетенных гидрохимических аномалий в этом типе районов не имеет решающего значения (аэробная гидробиохимическая зона).

Для 2-го типа районов характерно то, что наряду с окислительными протекают восстановительные биохимические процессы, так как совместно с тионовыми бактериями здесь развиваются и сульфатвосстанавливающие (смешанная гидробиохимическая зона). Джезказганский район занимает часть Центрально-Казахстанской мелкосопочной равнины с абсолютными отметками 380—500 м. Климат местности аридный, континентальный, количество выпадающих атмосферных осадков колеблется от 80 до 200 мм/год. В гидрогеологическом отношении Джезказганская впадина является артезианским бассейном с затрудненным водообменом. Аэробный *T. ferrooxidans* в этих условиях не развивается, но такие виды, как *T. thiooxidans*, растущий на среде с гипосульфитом, и *T. thioparus*, активны.

гидрохимических и литохимических аномалий по микробиологическим данным

<i>T. thioparis</i>		<i>T. denitrificans</i>		Сульфатвосстанавливающие		Гидробиохимическая зона
Встречаемость, %	Активность (окислено $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, %)	Встречаемость, %	Активность (образовано NO_2^- , мг/л)	Встречаемость, %	Активность	
23	10	15	0,4	0	0	Аэробная
90	70	100	200, до N_2	70	++	Смешанная

Исключительно высоко активен в водах этого района факультативно-анаэробный вид *T. denitrificans*. Подземным водам в районе месторождения свойственны высокие концентрации халькофильных элементов, однако распределение их весьма неравномерно. На одних участках концентрации элементов минеральной составляющей вод соответствуют концентрации их в рудах, а на других они недостаточны. Низкие концентрации элементов в водах этого района Е. Е. Белякова объясняет влиянием неблагоприятных значений рН для миграции халькофильных элементов и сорбционным воздействием пород. Существенную роль в образовании угнетенных концентраций элементов в районах, сходных с Джезказганским, играют, как считает автор и Е. Е. Белякова, широко распространенные (встречаемость 70 %) и активные (см. табл. 45) сульфатвосстанавливающие бактерии. На тех участках, где эти бактерии преобладают над тионовыми, обычно устанавливаются угнетенные концентрации ряда халькофильных элементов, и наоборот, при слабом их развитии такие концентрации встречаются реже.

Возможно, что на поведение халькофильных элементов в водах, в частности на распределение меди в водах Джезказганского района, влияют гетеротрофы и другие микроорганизмы, геохимическая роль которых пока мало изучена. Количество гетеротрофов в водах месторождения довольно значительно и составляет тысячи клеток в 1 мл (в среднем). Таким образом, несоответствие распределения концентраций халькофильных элементов в водах пород и руд может быть обусловлено разными причинами. Одной из них можно считать воздействие микроорганизмов, которое необходимо учитывать при интерпретации гидрохимических данных.

Исследования, проведенные совместно с Е. Е. Беляковой на редкометалльных, полиметаллических и медных месторождениях Казахстана (молибден-вольфрам-грейзеновая, барит-полиметаллическая, сфалерит-галенитовая, медноколчеданная, медно-молибденовая рудные формации и формация медистых песчаников),

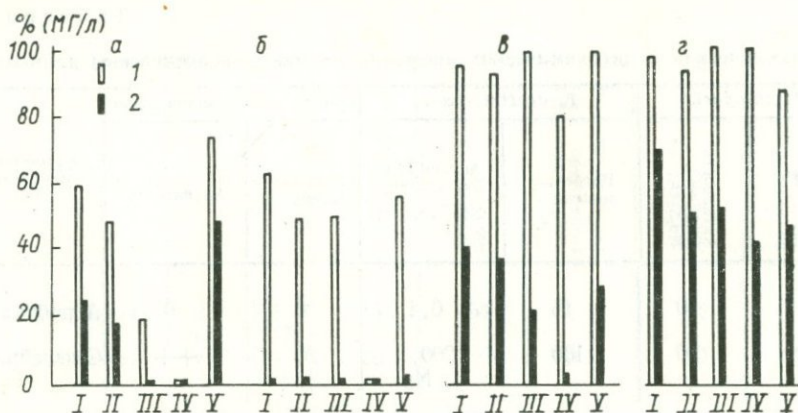


Рис. 7. Встречаемость (1) и активность (2) тионовых бактерий в подземных водах редкометалльного месторождения и пород, содержащих рассеянную минерализацию.

А — *T. thiooxidans*; б — *T. ferrooxidans*; в — *T. denitrificans*; г — *T. thioparus*.

I—V — воды: I — собственно рудных тел, II — вмещающие рудные тела пород, III — рыхлых образований на месторождениях, IV — содержащие рассеянную рудную минерализацию, V — рыхлых образований и безрудных пород, испытывающих воздействие подземных вод, контактировавших в недрах со скрытыми рудными телами.

показали, что водам рудных тел свойственны определенные биоценозы микроорганизмов. Изучение видового состава и активности тионовых бактерий в подземных водах, связанных с породами, характеризующимися различной степенью редкометалльного оруденения (рис. 7), позволило обнаружить микроорганизмы *T. thiooxidans* и *T. ferrooxidans* в подземных водах собственно рудных тел (I), в водах, вмещающих рудные тела пород (II), и в водах рыхлых образований на месторождениях (III). В подземных водах пород, содержащих рассеянную рудную минерализацию (IV), эти микроорганизмы не обнаружены.

В подземных водах, связанных с оруденением, вид *T. thiooxidans* был значительно активнее, чем вид *T. ferrooxidans*, что объясняется, по-видимому, слишком высокими значениями pH исследованных вод, неблагоприятными для развития последнего. *T. denitrificans* и *T. thioparus* характеризовались широким распространением в подземных водах, как связанных, так и не связанных с оруденением. Однако первый, как видно из рис. 7, был активен только в водах рудоносных пород (I, II, III) и отличался слабой активностью в водах пород с рассеянной минерализацией (IV); второй же характеризовался высокой активностью в водах пород независимо от их рудоносности.

Особого внимания заслуживают данные о распределении и активности тионовых бактерий в водах рыхлых образований и безрудных пород, испытывающих воздействие подземных вод, контактировавших в недрах со скрытыми рудными телами (V). В случае подтока подземных вод, связанных с рудными телами, к водам, циркулирующим в нерудоносных породах, в последних

обнаруживаются активные *T. thiooxidans* (растущие на среде с гипосульфитом), *T. denitrificans* и малоактивный *T. ferrooxidans*. Эти данные указывают на возможности использования микроорганизмов при поисках оруденения, скрытого на глубине.

В водах разных рудных формаций названные виды бактерий различаются активностью и неодинаковым соотношением друг с другом, что обусловлено как гидрогеологическими условиями, так и минеральным составом рудных тел (табл. 46). В водах медноколчеданных месторождений (например, Дегтярское) с близ-поверхностным залеганием руд и интенсивным водообменом активно развиваются *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans*. Вид *T. denitrificans* встречается редко и малоактивен [31]. В месторождениях с аналогичным вещественным составом (например, Урупское) при замедленном водообмене наиболее активно развиваются *T. denitrificans* и *T. thiooxidans* (последний растет на среде с гипосульфитом), а *T. ferrooxidans* встречается реже и малоактивен [51].

Воды месторождений формаций медистых песчаников при замедленном водообмене характеризуются активными *T. denitrificans* и *T. thiooxidans* (растущими на среде с гипосульфитом); *T. ferrooxidans* на месторождении отсутствует (табл. 46). На примере Белоканского полиметаллического месторождения установлено, что в водах рудных тел при интенсивном водообмене развиваются *T. thiooxidans* и *T. ferrooxidans* со средней и малой активностью. Воды, испытывающие влияние полиметаллических руд в Центральном Казахстане, характеризуются среднеактивными *T. denitrificans* и малоактивными *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans*. Другие тионовые бактерии, выявленные нами, в частности *T. thioparus* и *T. trautweinii*, а также сульфатвосстанавливающие бактерии и гетеротрофы, распространены и активны в водах месторождений разных рудных формаций.

Таким образом, из числа исследованных аэробных, факультативных и анаэробных микроорганизмов, составляющих ценозы рудных месторождений горноскладчатых областей, выделяются бактерии, имеющие основное и подчиненное поисковое значение. Основное значение принадлежит видам *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans* и *T. denitrificans*, подчиненное *T. thioparus* и *T. trautweinii*, а также сульфатвосстанавливающим бактериям, не отражающим связи вод с оруденением, но сопутствующим видам *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans* и *T. denitrificans*. Сопровождая бактерии с основным поисковым значением, виды подчиненного значения могут быть индикаторами гидрогеологической обстановки на месторождениях. Развиваясь в системе вода—порода при малом содержании кислорода (*T. thioparus*) или при полном его отсутствии (сульфатвосстанавливающие бактерии), они свидетельствуют о затрудненном водообмене, который может быть характерен для оруденения, скрытого на глубине.

При поисках скрытого на глубине оруденения особое внимание следует уделять биоценозам, в состав которых входит *T. denitri-*

Микробиологические ассоциации (ценозы) сульфидных месторождений

Район исследования; рельеф; водообмен	Тип месторождения	Аэробные (внешний акцептор O ₂)						Факультативные (внешний акцептор O ₂ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻)				Анаэробные (внешний акцептор SO ₄) сульфатвосста- навливающие (<i>D. desulfuricans</i>)		Гетеротрофы, растущие на белковых средах (искло клеток в 1 мл воды)
		<i>T. ferro-oxidans</i>		<i>T. thiooxidans</i>		<i>T. thioparus</i>		<i>T. denitrificans</i>		<i>T. trautweinii</i>		Встречае- мость, %	Активность	
		Встречае- мость, %	Активность (образовано Fe ³⁺ , мг/л)	Встречае- мость, %	Активность (окислено Na ₂ S ₂ O ₃ , %)	Встречае- мость, %	Активность (окислено Na ₂ S ₂ O ₃ , %)	Встречае- мость, %	Активность (образовано NO ₂ ⁻ , мг/л)	Встречае- мость, %	Активность (окислено Na ₂ S ₂ O ₃ , %)			
Забайкалье; высокогорье; весьма интенсивный	Медистых песчаников	46	1,3	46	30	23	10	15	1,0	Не опр.		0	0	Тысячи
Урал; среднегорье; интен- сивный	Меднокол- чеданный	92	325	75	56	30	20	15	3,0	30	30	0	0	Еди- ницы
Кавказ; высокогорье; ин- тенсивный	Полиметал- лический	40	4,0	56	36	40	40	54	4	Не опр.		25	++	Сотни
Кавказ; среднегорье; интенсивный и замед- ленный	Меднокол- чеданный	17	1,0	75	67	83	50	85	120	75	70	16	+++	Не опр.
Казахстан; мелкосопоч- ник и равнинный ланд- шафт; интенсивный и замедленный	Полиметал- лический	22	1,0	15	20	52	47	57	15	Не опр.		58	+++	Десят- ки тысяч
То же	Редкоме- талльный	52	1,0	52	27	74	54	75	34	.		77	++	Тысячи
„	Медистых песчаников	0	0	70	69	90	70	100	124	.		70	++	.

ficans. Этот факультативно-анаэробный микроорганизм свидетельствует о связи подземных вод с сульфидным оруденением и способен развиваться в системе вода—порода при полном отсутствии свободного кислорода.

Существенное значение при использовании микроорганизмов в качестве индикаторов природы геохимических полей распределения рудных элементов в водах и породах, а также поисковых признаков сульфидных руд представляют данные о распространении и активности тионовых бактерий в водах с фоновым содержанием халькофильных элементов. В этом случае воды необходимо исследовать микробиологическим методом, так как они могут быть связаны с оруденением, скрытым на глубине.

Устанавливаются две группы: 1) воды с нормальным фоновым содержанием халькофильных элементов, обусловленным отсутствием рудной минерализации в породах; 2) воды, повышенные концентрации халькофильных элементов в которых не обнаруживаются вследствие неблагоприятных условий для их миграции.

В водах первой группы основные поисковые виды тионовых бактерий *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans* и активный *T. denitrificans* не обнаруживаются. Отсутствие названных видов тионовых бактерий в составе исследуемых биоценозов характеризует «микробиологический фон». Во второй группе основные поисковые виды тионовых бактерий могут быть обнаружены. Присутствие в водах гидрохимического фона основных поисковых видов может рассматриваться как микробиологическая аномалия.

Микробиологические аномалии в водах гидрохимического фона имеют важное поисковое значение. Если повышенные концентрации основных поисковых элементов (Zn, Cu, Pb, Mo) в водах не устанавливаются, то о связи вод с оруденением свидетельствуют микробиологические аномалии, фиксируемые поисковыми видами *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans* и активным *T. denitrificans*.

Наряду с вышеописанными могут быть обнаружены воды, для которых характерны не фоновые содержания, а повышенные концентрации рудных элементов, образовавшиеся за счет испарения и ряда других причин. В этих водах, так же как и в водах с фоновым содержанием элементов, основные поисковые виды тионовых бактерий не выявлены.

Не всегда удается проверить наличие предполагаемого на глубине оруденения. В тех случаях, когда это удавалось, были получены положительные результаты. Так, при исследовании фоновых вод на южном склоне хр. Танну-Ола по наличию малоактивного *T. ferrooxidans* и активных *T. thiooxidans* и *T. denitrificans* в зоне глубоких нарушений установлено железорудное проявление. На территории Саяно-Алтайской области по микробиологическим показателям с учетом геологического строения выделены перспективные участки (Хондергейский, Пулунский) [48]. Перспективные на рудные полезные ископаемые участки выделены с привлечением микробиологических данных для уточнения природы гидрогеохимических аномалий и фоновых полей

в Казахстане [Геология и металлогения Успенской тектонической зоны, 1968 г.].

В целях поисков, а также для уточнения природы концентраций рудных элементов микробиологическим методом могут исследоваться не только природные воды, но и породы. Постановка микробиологического опробования при металлометрической съемке дает положительные результаты. Так, в итоге определения видового состава и активности тионовых и сульфатвосстанавливающих бактерий в рыхлых отложениях Шалгынского и других районов Центрального Казахстана уточнена природа концентраций таких халькофильных элементов, как Mo, Pb, Cu, Zn. Это позволило отличить накопительные литохимические аномалии от рудных и более точно оконтурить скрытые под наносами рудные тела [33].

Применение микробиологического метода для поисков сульфидных руд наиболее эффективно в комплексе с гидрохимическим методом. Целесообразность этого диктуется общностью организационных вопросов, связанных с выбором рациональной сети опробования, требованиями к объектам опробования, а также интерпретацией получаемых микробиологических данных.

При использовании микроорганизмов для поисков сульфидных руд за основу можно взять тип микробиологических ассоциаций, характерных для сульфидных месторождений и рудопроявлений и расположенных в системах, разных по характеру водообмена (табл. 47). В табл. 47 представлены наиболее вероятные сочетания видов тионовых бактерий, имеющих основное (*T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans*, *T. denitrificans*) и подчиненное (*T. thioparus*, *T. trautweinii*) поисковое значение.

По сочетанию и активности бактерий можно судить о связи вод с оруденением, приуроченным к участкам с различными геологическими и гидрогеологическими условиями. Так, малоактивные *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans*, развивающиеся обычно при отсутствии *T. thioparus*, *T. trautweinii* и *T. denitrificans*, отражают связь подземных вод с оруденением, выходящим на поверхность при весьма интенсивном водообмене. Для рудных тел, частично выходящих на поверхность и скрытых под наносами с интенсивным, а также замедленным водообменом, характерен активный *T. thiooxidans* в сочетании с активным или малоактивным *T. denitrificans* и малоактивным *T. ferrooxidans* в присутствии *T. thioparus* и *T. trautweinii*. Виды *T. thioparus* и *T. trautweinii* не отражают прямой связи с оруденением, однако указывают на условия затрудненного водообмена. *T. denitrificans* в сочетании с *T. thioparus* (средней активности) фиксирует оруденение, погребенное под чехлом рыхлых отложений или расположенное ниже базиса эрозии при замедленном водообмене.

Микробиологический метод может применяться при исследовании подземных вод с различными минерализацией, температурой и разными значениями рН. При оценке активности основных поисковых видов тионовых бактерий, выявляемых в подземных

Типы поисковых микробиологических ассоциаций сульфидных месторождений и рудопоявлений, расположенных в разных по характеру водообмена системах

Активность сульфатвосстановливающих бактерий	Преобладающие виды тионовых бактерий (встречаемость более 50 %)	Активность тионовых бактерий	Тип месторождения	Интенсивность водообмена	Условия залегания рудных тел
Аэробная гидробиохимическая зона					
0	<i>T. ferrooxidans</i> * <i>T. thiooxidans</i> *	Малоактивны	Медистых песчаников	Весьма интенсивный Интенсивный	Выходят на поверхность
0	<i>T. ferrooxidans</i> <i>T. thiooxidans</i>	Весьма активны Активны	Медноколчедан- ный		Залегают глубоко, не скрыты горными выра- ботками
Смешанная гидробиохимическая зона					
++	<i>T. thiooxidans</i> <i>T. denitrificans</i>	Активны Малоактивны	Полиметаллический	Интенсивный, местами замедленный	Выходят на поверхность, частично скрыты под наносами
++	<i>T. ferrooxidans</i> <i>T. thiooxidans</i> <i>T. denitrificans</i> <i>T. thioparus</i>	„ Активны „ „	Редкометалльный		
+++	<i>T. thiooxidans</i> <i>T. denitrificans</i> <i>T. trautweinii</i> <i>T. thioparus</i>	„ Весьма активны Активны „	Медноколчедан- ный		
++	<i>T. thiooxidans</i> <i>T. denitrificans</i> <i>T. thioparus</i>	„ „ „	Медистых песча- ников		
++	<i>T. denitrificans</i> <i>T. thioparus</i>	Среднеактивны „	Полиметаллический	Замедленный	Скрыты глубоко под на- носами

* Несколько меньше 50 %.

водах, рекомендуется принимать во внимание данные, характеризующие отношение микроорганизмов к физико-химическим условиям. Так, при выявлении кислотолюбивых видов *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans* в слабокислых, нейтральных и щелочных водах следует учитывать в качестве поискового признака не только их высокую, но и слабую активность. Последнюю важно учитывать при поисках сульфидных руд в районах многолетней мерзлоты.

На данном этапе, когда еще не накоплен в достаточном количестве материал микробиологических исследований для составления специальных микробиологических карт, данные микробиологического анализа можно наносить на соответствующие геохимические карты с условными обозначениями, разработанными во ВСЕГЕИ. Примером может служить схема распределения концентраций химических элементов в водах центральной равнинно-мелкосопочной части Успенской тектонической зоны, составленная Е. Е. Беляковой и Т. Ф. Кронидовой [1968 г., 28]. Поисковое значение микроорганизмов, населяющих сульфидные месторождения горноскладчатых областей, не исчерпывается приведенными данными. При дальнейших микробиологических исследованиях системы вода—порода месторождений возможно обнаружение новых видов и ассоциаций поисковых бактерий. Так, описан новый тип тионовых бактерий — *Thiobacillus «y»* из сурьмяно-ртутных месторождений, который окисляет антимонит [Медведева Н. Н., 1980 г.]. В результате изучения условий распространения этого вида в системе вода—порода сульфидных месторождений и за их пределами можно наметить возможности использования данного организма при поисках рудных тел. То же относится и к микроорганизму *T. organoparus* и др.

Необходимо подчеркнуть, что микробиологический метод не требует больших затрат, может применяться непосредственно в полевых условиях. Эффективность метода проверена опытно-методическими работами в различных регионах СССР. Метод оценки активности бактерий, обитающих в системе вода—порода, прост и рекомендуется для широкого внедрения в практику гидрогеохимических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микробиологические, гидрогеологические и гидрохимические комплексные исследования подземных вод различных гидрогеологических структур на территории СССР, а также экспериментальные работы позволили выявить ряд закономерностей, связанных с геохимической деятельностью микроорганизмов в системе вода—горная порода. Установлено, что микроорганизмы широко распространены в подземных водах. Они живут на больших глубинах (3 км), в широких температурных пределах (от -2 до 98°C), при разной степени минерализации подземных вод (от 0,01 до 300 г/л) и разных значениях рН (от 0,64 до 11,05). Способность микроорганизмов развиваться в отсутствие молекулярного кислорода, переносить экстремальные условия среды (термофильность, галофильность микроорганизмов) свидетельствует о том, что биогеохимические процессы протекают не только в зоне гипергеиза, но и на больших глубинах при повышенных температурах и давлениях, где происходит последующее преобразование пород и подземных вод.

На разных участках земной коры геохимическая деятельность микроорганизмов протекает по-разному, что обусловлено неоднородностью среды их обитания.

В подземных водах складчатых областей (массивов) и артезианских бассейнов формируются бактериальные ценозы, характеризующиеся разными биохимическими функциями. В сверхпресных и пресных водах массивов формируются биоценозы только с окислительными биохимическими функциями (аэробные тионовые, аммонифицирующие бактерии). По мере увеличения минерализации появляются микроорганизмы, которые могут переходить от окислительных биохимических функций к восстановительным (факультативно-анаэробные денитрифицирующие миксотрофы и гетеротрофы).

Бактерии, характеризующиеся восстановительными биохимическими функциями (сульфатовосстанавливающие, водородпродуцирующие), присущи главным образом водам артезианских бассейнов.

В артезианских бассейнах с нормальными гидрохимическими разрезами на микрофлору подземных вод (ее состав, активность, численность) влияют по крайней мере три взаимосвязанных фактора: глубина, температура и минерализация воды.

Высокая минерализация воды, равно как глубина и температура, ограничивает развитие аэробных микроорганизмов, но не угнетает (до определенных пределов) жизнедеятельность факульт-

тативных и анаэробных. Более того, в ряде случаев факультативные и анаэробные бактерии усиливают свою активность на больших глубинах и при более высоких температурах, что связано, по-видимому, с их адаптацией к данным физико-химическим факторам.

Адаптация микроорганизмов происходит также и по отношению к рН подземных вод. Так, развитие некоторых кислотолюбивых и щелочелюбивых видов тионовых бактерий (*T. thiooxidans*, *T. trautweinii*) в подземных водах протекает далеко за пределами известных для них оптимальных значений рН, установленных в лабораторных условиях.

Положительное влияние на адаптацию тионовых бактерий к различным значениям рН оказывает рудная сульфидная минерализация. В присутствии сульфидной минерализации кислотолюбивые виды тионовых бактерий могут развиваться в нейтральных, а иногда и щелочных водах, а щелочелюбивые способны жить в кислых, а иногда и сильнокислых водах.

Адаптируются микроорганизмы и к высоким концентрациям рудных элементов (Cu, Zn, Mo, Mn, Fe и др.), содержание которых (Cu, Zn, Fe) в рудничных водах достигает нескольких тысяч миллиграммов на литр. В процессе адаптации к физико-химическим факторам происходит селекция микроорганизмов в подземных водах.

Разные характер и направленность окислительно-восстановительных биогеохимических процессов, осуществляемых микроорганизмами, зависят от источников энергии — доноров и внешних акцепторов электронов, используемых бактериями для энергетического и конструктивного обмена веществ. Донорами электронов (субстратами, подвергающимися биологическому окислению) являются различные органические и минеральные вещества, обычно содержащиеся в породах и водах, внешними акцепторами — чаще всего свободный и связанный кислород.

Между микроорганизмами и источниками энергии, заключенными в системе вода—порода, существует тесная взаимосвязь. Это обуславливает зональное распределение и специфику микроорганизмов, обитающих в подземных водах. В пределах той части земной коры, где возможна бактериальная жизнь (температура до 100°C, минерализация до 300 г/л), в вертикальном разрезе выделяются три гидробиохимические зоны: аэробная, смешанная и анаэробная. За пределами указанных физико-химических параметров находится четвертая зона отсутствия бактерий. Каждая из названных зон характеризуется определенным групповым и видовым составом микроорганизмов и комплексом продуктов их жизнедеятельности, которые являются геохимическими показателями этих зон.

Аэробная гидробиохимическая зона характеризуется тем, что в ней живут и проявляют геохимическую деятельность микроорганизмы, использующие в качестве внешних акцепторов электронов свободный кислород, т. е. аэробные бактерии. В этой зоне

протекают окислительные биогеохимические процессы. Они сопровождаются образованием различных окисных форм углерода, азота, серы. Металлы здесь обнаруживаются в своей наивысшей валентности. Зона благоприятна для перехода рудных элементов из пород в природные воды и для их водной миграции.

В смешанной зоне развиваются бактерии, использующие в качестве внешних акцепторов свободный и связанный кислород в форме сульфатов, нитратов, уголекислоты (аэробные, факультативно-аэробные и анаэробные бактерии). В этой зоне протекают как окислительные, так и восстановительные, т. е. противонаправленные, биогеохимические процессы, которые сопровождаются образованием окисных и восстановленных форм углерода, азота, серы. Здесь могут иметь место как миграция, так и аккумуляция рудных элементов.

Анаэробная гидробиохимическая зона характеризуется развитием бактерий, использующих в качестве внешних акцепторов только связанный кислород (анаэробные бактерии). В этой зоне протекают восстановительные биогеохимические процессы. Продуктами жизнедеятельности бактерий являются восстановленные формы углерода, азота, серы. Металлам зоны присуща низкая валентность. Зона благоприятна для перехода рудных элементов из подземных вод в породы.

В зоне отсутствия бактерий, где в настоящее время биохимические процессы не протекают, продукты жизнедеятельности микроорганизмов могут быть обнаружены, что свидетельствует об их бывшей биогеохимической деятельности.

Формирование гидробиохимической зональности тесно связано с закономерностями распространения и формирования подземных вод, их динамикой, вещественным составом пород. Первые три гидробиохимические зоны, в которых протекают современные окислительно-восстановительные процессы, приурочены к зонам свободного и затрудненного водообмена, соответствующим, согласно И. К. Зайцеву [14], верхнему гидродинамическому этажу с преимущественным развитием инфильтрационных вод. Зона отсутствия бактерий связана с нижним гидродинамическим этажом, где развиты преимущественно седиментогенные воды.

Гидробиохимическая зональность — это индикатор направленных окислительно-восстановительных биогеохимических процессов, протекающих в системе вода—порода. Ее выявление и изучение могут быть использованы для определения: 1) положения кислородных границ в различных гидрогеологических структурах как в региональном плане, так и в пределах отдельных водоносных комплексов; 2) степени изоляции водоносных комплексов от дневной поверхности; 3) характера физико-химического состояния исследуемых систем; 4) условий миграции и аккумуляции рудных элементов в системе вода—порода. Кроме того, микроорганизмы могут быть использованы для поисков полезных ископаемых.

Направленность окислительно-восстановительных биогеохимических процессов может быть установлена с помощью коэффи-

циента аэробности среды (процентное отношение встречаемости аэробных бактерий к анаэробным), который изменяется в широких пределах — от нуля в условиях сильновосстановительной среды до ∞ в условиях сильноокислительной.

Исследования показали, что на сульфидных месторождениях, расположенных в аэробной гидробиохимической зоне, биогенное окисление сульфидных руд и миграция халькофильных элементов протекают весьма интенсивно. Под влиянием аэробных кислотолюбивых и кислотоустойчивых видов тионовых бактерий процесс перехода меди, свинца, цинка и других элементов в водные растворы ускоряется в десятки, сотни, а иногда и тысячи раз по сравнению с растворами, где эти микроорганизмы не развиты. На рудных месторождениях, расположенных в смешанной гидробиохимической зоне, где наряду с аэробными тионовыми бактериями развиваются анаэробные сульфатвосстанавливающие, вынос из пород и водная миграция рудных элементов протекают с меньшей интенсивностью.

Таким образом, обитающие в подземных водах микроорганизмы участвуют в процессах миграции и аккумуляции химических (рудных) элементов. Деятельность одних приводит к выносу рудных элементов из пород и их водной миграции, других, наоборот, обуславливает аккумуляцию элементов в породах. С этой противонаправленной окислительно-восстановительной деятельностью микроорганизмов связаны процессы формирования и разрушения месторождений полезных ископаемых.

Большое значение гидробиохимическая зональность приобретает при оценке условий формирования, сохранения и разрушения месторождений полезных ископаемых. Разрушение месторождений чаще всего происходит в аэробной зоне. Однако она может оказаться благоприятной и для формирования некоторых месторождений, например железомарганцевых руд, формирующихся в открытых водоемах.

Смешанная гидробиохимическая зона благоприятна для образования месторождений серы, так как именно здесь создаются условия для неполного биохимического окисления сероводорода до свободной серы. Формирование бокситов может происходить как в аэробной, так и смешанной зонах, где развиваются бактерии, участвующие в выщелачивании алюмосиликатов. Анаэробная гидробиохимическая зона благоприятна для образования сульфидов, зона отсутствия бактерий — для сохранения месторождений полезных ископаемых.

В условиях, соответствующих анаэробной гидробиохимической зоне, где активно развивались сульфатвосстанавливающие бактерии, нами [4] экспериментально получены ковелин CuS , галенит PbS , гринокит CdS , халькопирит CuFeS_2 . В опытах без бактерий сульфидообразования не наблюдалось.

Под влиянием водородпродуцирующих бактерий, жизнедеятельность которых на среде с глюкозой сопровождалась образованием водорода, углекислого газа, простых органических кислот

с понижением рН среды, происходило разложение габбро-лабрадорита. Из габбро-лабрадорита в раствор выносились кремнезем и железо. Окислы и гидроокислы алюминия в этих условиях, создаваемых микроорганизмами, обладали наименьшей растворимостью, что и определяло процесс бокситообразования.

Развитие биогеохимических процессов в подземных водах связано не только с присутствием соответствующих акцепторов электронов, но зависит также от наличия определенных донаторов электронов (органических и минеральных веществ), подвергающихся биогенному окислению. При достаточном количестве веществ, вступающих в окислительно-восстановительные биохимические реакции, происходят заметные изменения химического состава подземных вод. Такие благоприятные для жизнедеятельности бактерий условия чаще всего создаются в подземных водах, связанных с месторождениями полезных ископаемых. Так, накопление газов N_2 , H_2 , CO_2 , CH_4 наблюдается главным образом в водах артезианских бассейнов нефтегазоносных областей. Изменяется при этом и ионный состав подземных вод.

Изменение ионного состава подземных вод увязывается с характеристикой выявляемых здесь гидробиохимических зон от смешанной (аэробно-анаэробной) к анаэробной, а затем к зоне отсутствия бактерий, т. е. в сторону восстановительной среды; химический состав изменяется от гидрокарбонатно-сульфатного к хлоридно-сульфатному, а затем к хлоридному.

Процесс биогенного преобразования химического состава подземных вод происходит и в тех случаях, когда в энергетический обмен включаются различные руды, в частности сульфиды тяжелых металлов. На участках структур, где находятся рудные месторождения, наблюдается тесная взаимосвязь между активностью тионовых бактерий и максимальными концентрациями не только халькофильных (Cu, Zn, Pb, Fe, Mo и др.), но и нехалькофильных (Mn, K, F и др.) элементов в природных водах. На рудных (сульфидных) месторождениях при переходе смешанной гидробиохимической зоны к аэробной, т. е. в сторону окислительной среды, химический состав изменяется от хлоридно-гидрокарбонатного к гидрокарбонатному, а затем сульфатному.

По видовому составу тионовых бактерий, населяющих подземные воды, можно судить о степени окисленности руд. Степень биогенной окисленности сульфидов, тесно увязанная с концентрациями металлов в подземных водах, свидетельствует о том, что только при глубоком окислении руд, осуществляемом биоценозом бактерий, в состав которого входят кислотолюбивые и кислотоустойчивые виды *T. ferrooxidans* и *T. thiooxidans*, могут быть образованы наиболее высокие концентрации металлов в подземных водах. На начальных же стадиях окисления сульфидов, когда комплекс микроорганизмов, представленный щелочелюбивыми и растущими при нейтральных реакциях среды *T. thioparus*, *T. trautweinii*, *T. denitrificans* и др., не обеспечивает глубокого

окисления сульфидных минералов, высокие концентрации металлов в водах не образуются.

Все вышесказанное свидетельствует о большой геохимической роли микроорганизмов, обитающих в системе вода—горная порода. Это обязывает считаться с ними как с фактором, активно влияющим на процессы миграции, аккумуляции и перераспределения рудного вещества в земной коре. Очевидно, в той части подземной гидросферы, где возможна бактериальная жизнь, на геохимические процессы в той или иной степени влияют микроорганизмы. Тесная взаимосвязь микроорганизмов со средой их обитания и зональное их распределение, соответствующее гидродинамической и гидрохимической зональностям земной коры, позволяют использовать микробиологические данные для составления гидрохимических карт. С помощью микробиологических данных можно уточнять границы гидродинамических и гидрохимических зон, что особенно важно при средне- и крупномасштабном гидрогеологическом картировании.

Специфика микроорганизмов по отношению к источникам энергии, заключенным в месторождениях полезных ископаемых, позволяет использовать их в качестве поисковых признаков этих месторождений. Так, при поисках нефти и газа используются бактерии, окисляющие нефтяные углеводороды, а при поисках сульфидных руд — микроорганизмы, участвующие в окислении серы и ее производных, — тионовые бактерии.

Прямая зависимость распределения и активности отдельных видов тионовых бактерий в подземных водах и породах в зависимости от содержания оруденения в земной коре позволяет рассматривать микробиологический метод как один из важных при поисках рудных полезных ископаемых. Этот метод важен еще и потому, что микроорганизмы — тионовые и сульфатовосстанавливающие — могут быть использованы для оценки природы геохимических полей распределения рудных элементов в водах и породах (гидро- и литохимические аномалии), что имеет большое значение при поисках рудных месторождений гидрохимическим методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басков Е. А., Суриков С. Н. Гидротермы тихоокеанского сегмента земли. М., Недра, 1975. 171 с.
2. Белякова Е. Е. Нефтепоисковое значение подземных вод и растворенных в воде газов по данным исследований в районе Самаро-Камского междуречья Волго-Уральской нефтеносной области.— В кн.: Вопросы нефтепоисковой гидрогеологии. Л., 1956, вып. 18, с. 8—58.
3. Бурьянова Е. В. О главном минеральном парагенезисе в стратиформных месторождениях свинца и цинка.— Геология руд. м-ний, 1971, т. 13, № 2, с. 72—85.
4. Бурьянова Е. В., Крамаренко Л. Е. Биогенный синтез сульфидов из карбонатов Cu, Pb, Cd.— Литология и полезн. ископ., 1969, № 5, с. 36—39.
5. Вернадский В. И. Проблемы биогеохимии. М., Наука, 1980, вып. 1—6. 320 с.
6. Геохимические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений/А. А. Карцев, З. А. Табасаранский, М. И. Суббота, Г. А. Могилевский. М., Госоптехиздат, 1954. 430 с.
7. Германов А. И. Роль органического вещества в образовании гидротермальных сульфидных месторождений.— Изв. вузов. Геология и разведка, 1961, № 8, с. 60—73.
8. Гидрохимический метод поисков рудных месторождений в аридных и полупустынных областях/Е. Е. Белякова, А. А. Резников, Л. Е. Крамаренко и др. М., Госгеолтехиздат, 1962. 259 с.
9. Гуревич М. С., Померанец Л. Б., Поспелов А. П. Биогидрохимическая аномалия Гаурдакского серного месторождения.— В кн.: Доклады отделений и комиссий Географического общества СССР. Л., 1967, вып. 2, с. 112—127.
10. Дугова Е. Н., Петрова Н. А. Микрофлора подземных вод Небит-Дагского нефтяного месторождения.— В кн.: Геология и нефтегазоносность западной части Средней Азии. Л., Госоптехиздат, 1961, т. 46, вып. 2, с. 453—455.
11. Егоров С. В. Основные закономерности распространения динамики и химизма подземных вод Западно-Сибирской низменности.— В кн.: Геология СССР. М., Недра, 1964, т. 44, ч. 2, с. 183—190.
12. Егоров С. В., Крамаренко Л. Е. Микрофлора подземных вод Западной Сибири.— В кн.: Геология СССР, М., Недра, 1964, т. 44, ч. 2, с. 24—34.
13. Заварзин Г. А. Литотрофные микроорганизмы. М., Наука, 1972. 323 с.
14. Зайцев И. К. К вопросу о гидродинамике артезианских бассейнов.— В кн.: Доклады отделений и комиссий Географического общества СССР. Л., 1967, вып. 2, с. 24—34.
15. Зайцев И. К., Толстихин Н. И. Закономерности распространения и формирования минеральных подземных вод. М., Недра, 1972. 277 с.
16. Звягинцев Д. В. Взаимодействие микроорганизмов с твердыми поверхностями. М., Изд-во Моск. ун-та, 1972. 176 с.
17. Зуев А. В. Основные черты гидрогеохимии Саяно-Алтайской складчатой области.— В кн.: Материалы 4-го совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Иркутск—Владивосток, 1964, с. 125—129.
18. Иванов М. В. Роль микробиологических процессов в генезисе месторождений самородной серы. М., Наука, 1964. 368 с.
19. Каравайко Г. И., Кузнецов С. И., Голомзник А. И. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд. Наука, 1972. 248 с.
20. К вопросу о микрофлоре растворов горных пород/Н. А. Трифонова, П. А. Удолов, Н. В. Васильев и др.— В кн.: Микрофлора почв и вод бассейнов Сибири и Дальнего Востока. Томск. Изд-во ун-та, 1976, с. 292—295.

21. *Климов Г. И., Крамаренко Л. Е.* Опыт микробиологических исследований при гидрохимических поисках в высокогорных тундрах Севера Забайкалья. Чита, 1968, вып. 3(5), с. 149—151. (Забайкальск. фил. Геогр. о-ва СССР).
22. *Кондратьева Е. Н.* Фотосинтезирующие бактерии и бактериальный фотосинтез. М., Изд-во Моск. ун-та, 1972. 76 с.
23. *Кондратьева Е. Н., Гоготов И. Н.* Микроорганизмы — продуценты водорода.— Изв. АН СССР. Сер. Биол., 1976, № 1, с. 69—87.
24. *Крамаренко Л. Е.* Состав и распределение микроорганизмов в подземных водах и их поисковое значение.— В кн.: Вопросы нефтепоисковой гидрогеологии. Л., 1956, вып. 18, с. 93—115.
25. *Крамаренко Л. Е.* Бактериальные биоценозы в подземных водах месторождений некоторых полезных ископаемых и их геологическое значение.— Микробиология, 1962, т. 31, вып. 4, с. 694—701.
26. *Крамаренко Л. Е.* Значение биогенного фактора в осадочном рудообразовании.— Сов. геология, 1968, № 4, с. 70—82.
27. *Крамаренко Л. Е.* Гидробиохимическая зональность как индикатор окислительно-восстановительных процессов в подземной гидросфере.— В кн.: Гидрогеология и инженерная геология, М., Наука, 1972, с. 38—41.
28. *Крамаренко Л. Е.* Микробиологический метод поисков сульфидных руд. М., 1974, 53 с. (Всесоюз. науч.-исслед. ин-т экономики минер. сырья и геол.-развед. работ).
29. *Крамаренко Л. Е.* Микроорганизмы подземных вод и их геохимическое значение.— Труды ВСЕГЕИ. Новая сер., 1975. т. 241, с. 156—165.
30. *Крамаренко Л. Е., Басков Е. А., Егоров С. В.* О микрофлоре подземных вод Сибири.— В кн.: Вопросы специальной гидрогеологии Сибири и Дальнего Востока. Иркутск, 1962, с. 110—120.
31. *Крамаренко Л. Е., Морозов В. М.* Влияние микрофлоры на металлонность рудничных вод некоторых месторождений Среднего Урала.— В кн.: Гидрохимические материалы. Л., Гидрометеондат, 1973, т. 7, с. 64—75.
32. *Крамаренко Л. Е., Призренова И. И.* Денитрифицирующие, окисляющие серу бактерии в сульфидных месторождениях и метод их выявления при поисковых работах.— Труды ВСЕГЕИ. Новая сер., 1961, т. 61, с. 209—231.
33. *Крамаренко Л. Е., Призренова И. И., Тебенькова Р. И.* Роль биогенного фактора в формировании ореолов рассеяния молибденового месторождения Шалгия.— Информ. сб. ВСЕГЕИ, 1959, № 8, с. 109—116.
34. *Крамаренко Л. Е., Сафонова О. Ф.* Некоторые результаты изучения влияния микроорганизмов на разложение габбро-лабрадоритов.— В кн.: Геология и генезис бокситов СССР. Л., 1976, т. 209, с. 112—117.
35. *Крамаренко Л. Е., Шор Г. М.* О биогенном разрушении сероводородного геохимического барьера при экзогенном эпигенетическом рудообразовании.— В кн.: Доклады Географического общества СССР. Л., 1969, с. 106—109.
36. *Кузнецов С. И.* Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л., Наука, 1970. 440 с.
37. *Кузнецова З. И.* Распространение бактерий в подземных водах в зависимости от окислительно-восстановительных условий среды.— Микробиология, 1966, т. 35, вып. 5, с. 894—898.
38. *Лапо А. В.* Следы былых биосфер. М., Изд-во Знание, 1979. 174 с.
39. *Летунова С. В., Ковальский В. В.* Геохимическая экология микроорганизмов. М., Наука, 1978. 147 с.
40. *Лисицын А. К., Кузнецова Э. Г.* О роли микроорганизмов в образовании восстановительных геохимических барьеров на выклинивании зон пластовой лимонитизации.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1967, № 1, с. 31—45.
41. *Логонова Л. Г., Головачева Р. С., Головина И. Г.* Современные представления о термофилии микроорганизмов. М., Наука, 1973. 275 с.
42. *Ляликова Н. Н.* Участие *T. ferrooxidans* в окислении сульфидных руд на колчеданных месторождениях Среднего Урала.— Микробиология, 1960, т. 29, вып. 3, с. 382—387.
43. *Ляликова Н. Н.* Роль микроорганизмов в образовании и разрушении сульфидов в рудных месторождениях.— Геология руд. м-ний, 1970, № 1, с. 63—73.

44. *Методические указания по геологической съемке масштаба 1:50 000.* Вып. 10. Гидрохимические исследования/Е. Е. Белякова, Ю. К. Бурков, О. М. Гирфанова и др. Л., Недра, 1970. 376 с.
45. *Михайлов Л. Е.* Подземные воды Бухаро-Каршинского нефтегазоносного бассейна. Л., Гостоптехиздат, 1962. 165 с.
46. *Назарова Л. Н., Коновалов Г. С., Кобилев А. Г.* К вопросу о роли биогенного фактора в формировании химического состава шахтных вод Восточного Донбасса.— В кн.: Гидрохимические материалы, Л., 1967, т. 43, с. 132—136.
47. *О взаимосвязи гидробиохимической, гидрохимической, гидродинамической, зональности подземных вод Молдавского артезианского бассейна/Е. А. Ансберг, Л. Е. Крамаренко, Э. В. Козлова и др.—* В кн.: Гидрохимия основных гидрогеологических структур СССР. Л., 1978, т. 269, с. 85—93.
48. *О деятельности тионовых бактерий в подземных водах Западного Саяна и Западного Танну-Ола/О. М. Гирфанова, А. В. Зуев, Л. Е. Крамаренко и др.—* В кн.: формирование и геохимия подземных вод Сибири и Дальнего Востока. Иркутск—Владивосток, Наука, 1967, с. 185—188.
49. *Органические вещества и микрофлора подземных вод и их значение в процессе нефтеобразования./М. Е. Альтовский, Е. Л. Быкова, З. И. Кузнецова, В. М. Швец. М., Гостоптехиздат, 1962, 295 с.*
50. *Преобразование нефтей микроорганизмами.* Л., 1970. 219 с. (Тр. ВНИГРИ, вып. 281).
51. *Прокофьева Н. М., Крамаренко Л. Е.* Микроорганизмы в подземных водах Урупского рудоносного района (Северный Кавказ).— Науч. тр. Кубан. ун-та, 1977, № 239, с. 146—157.
52. *Розанова Е. П., Кузнецов С. И.* Микрофлора нефтяных месторождений. М., Наука, 1974. 198 с.
53. *Роль биогенного фактора в формировании химического состава подземных вод некоторых медно-колчеданных месторождений Урала/В. М. Пантелеев, З. Н. Беляева, Г. А. Волков и др.—* Тр. ВНИИ гидрогеологии и инженер. геологии, 1979, № 128, с. 80—87.
54. *Самарина В. С.* Гидрогеохимия. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. 359 с.
55. *Симакова Т. Л., Колесник З. А.* Бактерии пластовых вод, нефтей и пород нефтяных месторождений СССР.— Тр. ВНИГРИ, Л., 1962, вып. 199, 88 с.
56. *Тарасов В. М.* Основные черты формирования гидрохимической зональности Чу-Сарысуйского межгорного артезианского бассейна.— В кн.: Зональность подземных вод платформенных и горноскладчатых областей. Л., 1981, с. 67—77.
57. *Учительева Л. Г.* Минеральные воды Западно-Сибирского артезианского бассейна. М., Недра, 1974. 165 с.
58. *Феоктистов В. П., Крамаренко Л. Е.* О природе серой окраски Джезказганского месторождения.— Литология и полезн. ископ., 1971, № 3, с. 119—125.
59. *Швец В. М.* Органические вещества подземных вод. М., Недра, 1973. 191 с.
60. *Шлегель Г.* Общая микробиология. М., Мир, 1972. 476 с.
61. *Щербаков А. В.* Геохимия термальных вод. М., Наука, 1968. 234 с.
62. *Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов.* Отв. ред. М. В. Иванов. Пушино, Изд-во АН СССР, 1976. 179 с.
63. *Baalsrud K., Baalsrud K. S.* Studies on Thiobacillus denitrificans — Arch. Mikrobiol., 1954, v. 20, p. 34—62.
64. *Baas Beeking L. G. M., Kaplan I. R., Moor D.* Lemits of the natural environment in terms of pH and oxidatio-reduction potential.— J. geol., 1960, v. 63, N 3, p. 243—284.
65. *Bastin E. S.* The presence of Sulfate-reducing bacteria in oil field waters.— Science, 1926, v. 63, N 1618, p. 21—24.
66. *Berry V. K., Murr L. E.* Observations of selective attachment of bacteria an low-grade ore; evidence for direct-contact bacterial leaching of sulfide minerals.— Proc. 34th Ann. Meet. Electron Microsc. Soc. Amer. Miami Beach, Fla, 1976, Baton Rouge, La, 1976, p. 132—133.
67. *Bryner L. G., Anderson R.* Microorganisms in leaching sulfide minerals.— Industr. and Eng. Chem., 1957, p. 1721—1724.

68. *Bryner L. C., Beck I. V., Davis D. B., Wilson D. G.* Microorganisms in Leaching Sulfide Minerals.—*Industr. and Eng. Chem.*, 1954, v. 46, N 12, p. 2587—2592.

69. *Colmer A. R., Hinkle M.* The role of microorganisms in acid mine drainage.—*Science*, 1947, v. 106, p. 253—256.

70. *Fridman G. M.* Importance of microorganisms in sedimentation.—*Environ. Biogeochem. a. Geomicrobiol. Proc. 3rd Int. Symposium, Wolfenbüttel, Ann. Arbor, Mich.*, 1978, v. 1, p. 323—326.

71. *Jernelöv Arne, Martin Ann—Louise.* Ecological implications of metal metabolism by microorganisms.—*Ann. rev. Microbiol.*, 1975, v. 29, p. 61—77.

72. *Krumbein W. E.* Geomicrobiologische Prozesse bei der Anreicherung nutzbarer Minerale und sedimentarer Lagerstätten.—*Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie vereinigt mit Brennstoff-Chemie*, 1978, Bd 31, H. 3, S. 147—151.

73. *Silverman M. P., Ehrlich H. L.* Microbial Formation and Degradation of Minerals.—*In: Advances in Applied Microbiology*, New York—London, 1964, v. 6, p. 153—206.

74. *Temple K. L.* Singenesis of sulfide ores an evaluation of biochemical aspects.—*Econ. Geol.*, 1964, v. 59, N 8, p. 1473—1491.

75. *Trudinger P. A.* Experimental geomicrobiology in Australia.—*Earth Sci. Rev.*, v. 12, 1976, p. 259—278.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Краткие сведения о микроорганизмах	6
Глава II. Биогеохимическая характеристика микроорганизмов подземных вод	12
Глава III. Подземные воды как среда для жизнедеятельности микроорганизмов	26
Глава IV. Микробиологические пробы, методика выделения, оценка активности и численности бактерий	34
Глава V. Физико-химические факторы, влияющие на развитие и жизнедеятельность микроорганизмов в подземных водах	41
Влияние температуры	—
Влияние минерализации воды	50
Влияние pH	63
Глава VI. Гидробиохимическая зональность	69
Глава VII. Роль микроорганизмов в процессах водной миграции и аккумуляции химических элементов	85
Геохимическая деятельность тионовых бактерий как фактор миграции химических элементов	89
Геохимическая деятельность сульфатовосстанавливающих бактерий как фактор аккумуляции химических элементов	98
О геохимической деятельности водородпродуцирующих бактерий	124
Глава VIII. Влияние микроорганизмов на формирование химического состава подземных вод	133
Глава IX. Значение микроорганизмов для поисков полезных ископаемых	156
Микробиологический метод поисков нефти и газа	—
Микробиологический метод поисков сульфидных руд	159
Заключение	171
Список литературы	177

ЛЮДМИЛА ЕВСТАФЬЕВНА КРАМАРЕНКО

ГЕОХИМИЧЕСКОЕ
И ПОИСКОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ
МИКРООРГАНИЗМОВ
ПОДЗЕМНЫХ
ВОД

Редактор издательства Л. В. Попова
Переплет художника В. Н. Потекушина
Технический редактор Н. П. Старостина
Корректор Н. Д. Баримова

ИБ № 3354

Сдано в набор 09.11.82. Подписано в печать 08.06.83. М-27962. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 11,5. Усл. кр.-отг. 11,5. Уч.-изд. л. 12,92. Тираж 1600 экз. Заказ 63/518. Цена 95 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», Ленинградское отделение. 193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 12.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В Ленинградском отделении издательства «Недра» готовятся к печати и выйдут в свет в 1984 г. следующие книги, распространяемые по подписке.

1. Казаков И. Н. Тектоника и геологическое развитие древних и молодых платформ. 15 л. 2 р. 30 к.

Систематизированы и с палеотектонических позиций проанализированы фактические материалы по региональной геологии древних и молодых платформ Земли. Приведены основные закономерности геологического развития платформ.

Для геологов, интересующихся историей развития Земли.

План 1984 г., № 357.

2. Геологическая съемка районов развития куполовидных структур докембрия: Методическое пособие по геологической съемке масштаба 1 : 50 000. Вып. 9. 20 л. 1 р. 30 к.

Приведены критерии и признаки структурно-генетического разделения гранитно-гнейсовых куполов в районах древних щитов и складчатых областей. Рассмотрены методы их изучения при крупномасштабном геологическом картировании.

Для геологов, занимающихся геологическими съемками и поисками рудных месторождений.

План 1984 г., № 370

3. Геологическая документация при геологосъемочных работах: Методическое пособие по геологической съемке масштаба 1 : 50 000. Вып. 14. 20 л. 1 р. 30 к.

Рассмотрены основные требования, предъявляемые к качеству геологической документации. Дано описание форм документации для различных видов геологосъемочных работ.

Для геологов, занимающихся геологическими съемками и поисками полезных ископаемых.

План 1984 г., № 371.

4. Изучение тектонических структур: Методическое пособие по геологической съемке масштаба 1 : 50 000. Вып. 16. 20 л. 1 р. 30 к.

Приведены методы изучения разрывных нарушений и складчато-разрывных комплексов. Даны примеры детального изучения сложнодислоцированных комплексов в различных по строению районах.

Для геологов, занимающихся геологическими съемками и поисками рудных месторождений.

План 1984 г., № 372.

5. Муромцев В. С. Электрометрическая геология песчаных тел — литологических ловушек нефти и газа. 18 л. 1 р. 20 к.

Приведена методика получения информации о литолого-фациальном составе песчаных тел-коллекторов и глинистых экранов, их генетической природе и условиях осадконакопления с помощью электрокаротажа.

Для геологов-нефтяников и геофизиков, занятых поисками нефтяных и газовых месторождений.

План 1984 г., № 375.

6. Осадочные формации: Принципы и методы оценки рудоносности геологических формаций. 15 л. 75 к.

Рассмотрены критерии рудоносности наиболее важных групп осадочных формаций. Приведен рациональный комплекс методов оценки перспектив их рудоносности при прогнозных и поисковых работах.

Для геологов-съемщиков, поисковиков, литологов, специалистов в области металлогении и прогнозирования полезных ископаемых.

План 1984 г., № 377.

7. Геоиндикационное моделирование. 18 л. 2 р. 80 к.

Изложены теоретические основы и методы геоиндикационного моделирования, показан опыт построения и апробации геоиндикационных моделей отдельных объектов в различных природных условиях СССР.

Для геологов, геоморфологов, ландшафтоведов, использующих дистанционные съемки для изучения природных ресурсов.

План 1984 г., № 379.

8. Современные методы исследования нефтей. 35 л. 2 р. 20 к.

Приведены методы определения физико-химических свойств, группового состава нефтей. Предложен наиболее перспективный комплекс геохимических методов исследования.

Для инженерно-технических работников, занимающихся исследованиями химии и геохимии нефти и нефтяной геологией.

План 1984 г., № 382.

Подписка на перечисленные книги будет проводиться до 31 декабря 1983 г. магазинами и отделами подписных изданий и специализированными магазинами, распространяющими научно-техническую литературу, а также магазинами — опорными пунктами издательства «Недра».

При оформлении подписки индивидуальные покупатели оплачивают стоимость книги полностью. Подписка оформляется квитанцией. О поступлении изданий в магазин покупатель информируется почтовой открыткой, оставленной при оформлении подписки.

Организации и предприятия оформляют заказы на эти издания гарантийными письмами.

05 KON.

4280

DE JRA