

BOUND WATER IN ROCKS: NEW FACTS AND PROBLEMS

V. A. KOROLEV

The bound water located in rocks plays very important role in many geological processes and phenomena. The new data and the modern representations of its properties, as well as classification and influence of the bound water on the rock properties, are presented in this paper.

Связанная вода, находящаяся в горных породах, играет очень важную роль во многих геологических процессах и явлениях. В статье приведены новые данные и рассмотрены современные представления о ее свойствах, классификации и влиянии связанной воды на свойства горных пород.

СВЯЗАННАЯ ВОДА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ: НОВЫЕ ФАКТЫ И ПРОБЛЕМЫ

В. А. КОРОЛЕВ

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Вода — одно из самых распространенных веществ на Земле. Почти 70,8% площади земной поверхности покрыто водой. Содержание воды в морях, океанах и поверхностных водоемах (включая мировые запасы льдов) равно примерно 1,4 млрд. км³, а в горных породах в пределах литосферы (так называемые подземные воды) составляет по современным оценкам разных авторов около 0,73 — 0,84 млрд. км³, то есть примерно всего лишь вдвое меньше. Таким образом, “под землей” в земной коре запасено гигантское количество воды.

Вода находится в горных породах благодаря наличию в них всевозможных пустот (трещин, пор, каналов и т.д.). Абсолютно сплошных пород, не содержащих сколь-нибудь малое количество пор, в природе не существует. Эти пустоты, как правило, и занимает вода благодаря своей высокой подвижности (мобильности, текучести) наряду с другими мобильными компонентами, например такими, как газы, углеводородные флюиды и др. Установлено, что ниже уровня грунтовых вод до глубин около 4 — 5 км и более практически все пустоты горных пород (за исключением углеводородных залежей) заполнены водой, образующей в пределах литосферы региональные неразрывные макроскопические системы гидросферы. Они — предмет исследования гидрогеологии, науки, изучающей условия формирования, динамику и распространение запасов подземных вод на Земле. Мы же остановимся на некоторых интересных и важных особенностях воды в горных породах, проявляющихся в основном не на макроскопическом, а на микроскопическом уровне.

Очевидно, не многие знают, что вода в горных породах находится либо в свободном, либо в связанном состоянии. Поэтому выделяют две категории воды в горных породах — свободную и связанную. Свободная вода — это та, с которой все мы обычно привыкли иметь дело: она свободно может перемещаться в породах по крупным порам, трещинам путем фильтрации под действием силы тяжести или напора, она образует горизонты подземных вод и обладает обычными для воды физическими свойствами. Именно эта вода добывается и эксплуатируется человеком для различных нужд. В отличие от нее связанная вода находится и удерживается в наиболее

мелких порах и трещинах горных пород и испытывает со стороны поверхности твердой фазы минералов “связывающее” влияние разной природы и интенсивности, изменяющее ее структуру и придающее ей аномальные свойства, то есть не такие, как у обычной, свободной воды. Суммарное содержание связанной воды в литосфере Земли составляет от 0,31 до 0,35 млрд. км³, то есть около 42% от общего количества воды в земной коре (по данным Ф.А. Макаренко). Однако связанную воду не так просто извлечь из породы, в которой она находится. Под действием поверхностных сил разной природы она относительно прочно удерживается на поверхности минералов, не подчиняется силам гравитации и ее передвижение в породах может происходить лишь под влиянием сил иной природы. Настоящая статья знакомит с новыми фактами и современными взглядами на проблему формирования аномальных особенностей связанной воды и ее влияния на свойства горных пород.

УДИВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СВЯЗАННОЙ ВОДЫ

Первые представления о связанной воде возникли почти сто лет назад. Однако ее систематические исследования начались лишь в 20 – 30-е годы. В разработку теории связанной воды внесли большой вклад такие ученые как Б.В. Дерягин, А.В. Думанский, П.А. Ребиндер, Н.В. Чураев, а ее свойства в горных породах всесторонне исследовали А.Ф. Лебедев, Е.М. Сергеев, Ф.Д. Овчаренко, Ю.И. Тарасевич, Р.И. Злочевская и др. К настоящему времени достаточно хорошо изучено строение единичной молекулы воды, состоящей из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Она характеризуется дипольным строением и тетраэдрическим распределением зарядов: два положительных — на атомах водорода, два отрицательных — на неподеленных парах электронов атома кислорода (рис. 1). Такое строение молекулы воды позволяет ей образовывать до четырех водородных связей с соседними молекулами. При этом в двух связях молекула выступает как донор, а в двух — как акцептор протона. Однако структура собственно жидкой (свободной) воды — самого распространенного на Земле веществ

ва — до сих пор окончательно не выяснена. К настоящему времени предложено множество моделей, описывающих структуру жидкой (свободной) воды (см. выше статью А.Н. Глебова и А.Р. Буданова “Структурно-динамические свойства водных растворов электролитов”. С. 72 — 78). Наилучшее согласие с экспериментом дают так называемые континуальные модели воды, предполагающие существование трехмерного достаточно рыхлого непрерывного “каркаса” из молекул воды, соединенных водородными связями приблизительно в тетраэдрической координации. При этом следует иметь ввиду статистический характер структурных моделей, поскольку молекулы находятся в непрерывном тепловом движении. Континуальные модели допускают изгиб и растяжение водородных связей. По последним данным, среднее координационное число молекулы жидкой воды равно 4,4 — 4,5 (у льда оно равно 4), а среднее число водородных связей на молекулу оказалось равным 2 — 2,5. Наличие в свободной воде примесей каких-либо растворенных ионов или молекул существенно искажает ее структуру. Еще в большей степени структура искажается вблизи твердой поверхности минералов при образовании связанной воды.

Многочисленными экспериментами, начатыми еще в 30-е годы Б.В. Дерягиным, было установлено, что некоторые свойства связанной воды, находящейся в породах в виде тонких, так называемых граничных, слоев вблизи твердой поверхности, существенно отличаются от свойств обычной свободной воды. Их стали называть аномальными. Эти отличия объясняются искажением и перестройкой структуры связанной воды вблизи поверхности, изменением и искривлением сетки межмолекулярных водородных связей в ее структуре под влиянием поля поверхностных сил. Аномальные особенности связанной воды были прежде всего установлены для таких ее свойств, как плотность, вязкость, диэлектрическая проницаемость и др. Долгое время исследователи располагали противоречивыми сведениями о плотности связанной воды, которая, по некоторым экспериментальным данным, намного превышала плотность свободной воды и оказалась равной 1,2 — 1,4 г/см³ (а по некоторым данным доходила даже до 1,84 — 2,4 г/см³). В последнее время было убедительно установлено, что плотность связанной воды в тонких пленках (толщиной около 5 нанометров) повышена всего лишь на 1,5% по сравнению со свободной водой и составляет в среднем около 1,02 г/см³.

Твердые поверхности большинства минералов горных пород обладают гидрофильными свойствами, то есть хорошо смачиваются водой. Это обуславливает ориентацию молекул воды, представляющих собой диполи. Установлено, что молекулы воды ориентированы нормально к твердой поверхности (рис. 2). Ориентация происходит в основном под действием электростатического притяжения и

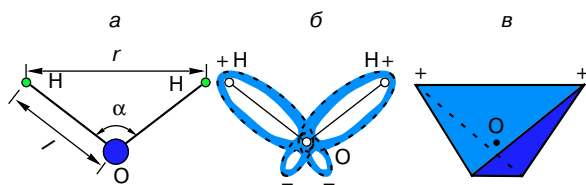


Рис. 1. Строение единичной молекулы воды: а — структура; б — модель электронных орбиталей; в — распределение зарядов (r — длина связи Н–Н, равная $1,41 \cdot 10^{-4}$ мкм; l — длина связи Н–О, равная $0,96 \cdot 10^{-4}$ мкм; α — угол Н–О–Н, равный $104,5^\circ$).

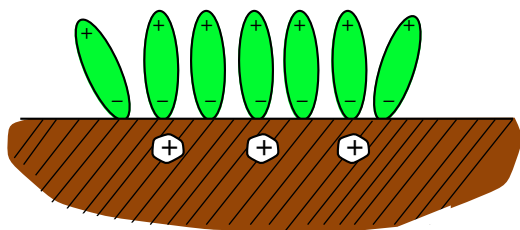


Рис. 2. Ориентация диполей молекул воды на активных адсорбционных центрах поверхности минерала.

обуславливает некоторое повышение плотности воды и снижение тангенциальной (то есть вдоль поверхности) подвижности ее молекул в слоях толщиной всего лишь в несколько нанометров. Это должно проявляться макроскопически в виде повышения вязкости связанной воды, что и наблюдается в экспериментах. Так, например, прямые измерения вязкости воды в очень тонких кварцевых капиллярах и тонкопористых стеклах, выполненные недавно, показали, что вязкость связанной воды повышается при уменьшении толщины пленки менее 1 мкм: при толщине пленки в 0,2 – 0,3 мкм ее вязкость повышена по сравнению со свободной водой в 1,1 раза, а при толщине всего в 10 нм повышена уже в 1,6 раза (рис. 3).

Структурные эффекты аномальных свойств связанной воды хорошо прослеживаются в опытах по исследованию их температурной зависимости. Так, например, при повышении температуры вязкость связанной воды снижается (как и у свободной воды) и при температуре 65 – 70°C она становится такой же, как и у свободной воды, то есть при нагревании происходит тепловое разрушение структуры

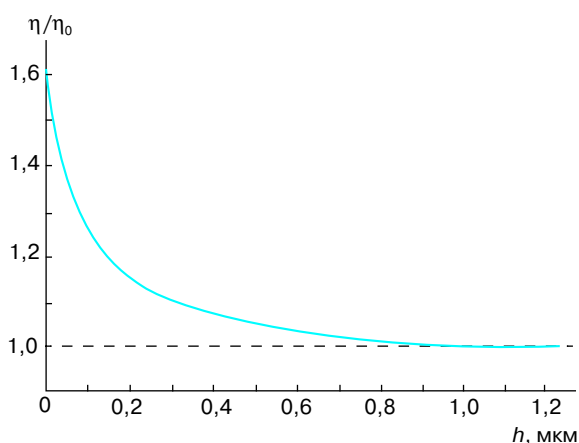


Рис. 3. Зависимость относительной вязкости связанной воды (η/η_0) от толщины (h) водной пленки: η – вязкость связанной воды, η_0 – вязкость свободной воды [1].

связанной воды, уменьшение толщины ее граничной фазы с искаженной структурой и переход в свободную воду. При понижении температуры, напротив, происходит обратное явление – структурирование связанной воды. Именно с этим связан и другой экспериментально обнаруженный и чрезвычайно интересный факт – понижение температуры замерзания связанной воды по сравнению со свободной. Известно, что фазовый переход вода–лед в свободной воде происходит при 0°C (273 К). Однако в пленках связанной структурированной воды он осуществляется при более низких отрицательных температурах, и чем тоньше пленка воды, тем при более низкой температуре она замерзает. Это явление имеет огромное значение и следствием его является то, что, например, в мерзлых горных породах, находящихся при температуре намного ниже 0°C, может существовать вода в жидком состоянии. На рис. 4 показана температурная зависимость толщины пленки незамерзшей связанной воды на поверхности таких широко распространенных глинистых минералов, как каолинит и монтмориллонит.

Основная причина понижения температуры замерзания связанной воды – взаимодействие ее с твердой минеральной поверхностью, точнее – с ее активными центрами. Энергия взаимодействия молекул воды с активными центрами поверхности минералов, а также с находящимися в поровом растворе ионами больше, чем энергия взаимодействия молекул воды между собой. Это и приводит к тому, что активный центр нарушает сетку водородных связей в воде, а фазовый переход осуществляется лишь при более низкой температуре. Не менее интересным свойством связанной воды в горных породах

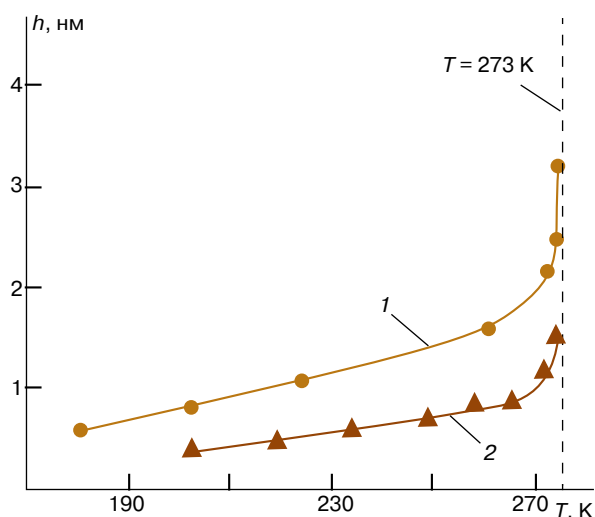


Рис. 4. Толщина пленки (h) незамерзшей воды в глинах в зависимости от температуры T : 1 – каолинитовая глина, 2 – монтмориллонитовая глина [3].

является ее пониженная по сравнению со свободной водой растворяющая способность. Связанная вода способна растворять меньше солей, чем обычная вода. Это обстоятельство также является следствием измененной структуры связанной воды. Теория нерастворяющего объема, объясняющая это аномальное свойство связанной воды, была всесторонне разработана Б.В. Дерягиным, а само явление нашло много практических приложений. В том числе на нем основан один из прямых способов определения количества связанной воды в горных породах. Наличие нерастворяющего объема связанной воды играет большую роль в процессах геохимической миграции веществ в земной коре.

Другое аномальное свойство связанной воды — понижение ее диэлектрической проницаемости в несколько раз по сравнению со свободной водой. Если для обычной воды диэлектрическая проницаемость равна 81, то для связанной воды эта величина уменьшается до 3 — 40, в зависимости от толщины водной пленки. По последним данным, прослойки связанной воды толщиной 0,5 — 0,6 нм имеют диэлектрическую проницаемость, равную всего 3 — 4. Структурные изменения связанной воды обуславливают и изменение ее температуропроводности. Отклонения температуропроводности связанной воды в сторону снижения от значений, характерных для свободной воды, начинают проявляться в водных пленках и прослойках толщиной менее 1 мкм. Чем тоньше слой связанной воды, тем в большей мере понижена ее температуропроводность. В прослойках толщиной всего 0,03 мкм температуропроводность понижена примерно на 30% по сравнению со свободной водой.

Все эти и другие аномальные особенности связанной воды придают горным породам, в которых она находится, характерные специфические свойства, рассматриваемые ниже. Это и является одной из основных причин пристального внимания геологов во всех странах (прежде всего инженеров-геологов, гидрогеологов, геохимиков) к связанной воде.

КАТЕГОРИИ ВОДЫ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Связанная вода в горных породах неоднородна. В ней может быть выделен ряд категорий, отличающихся по природе и условиям образования, по свойствам и многим другим особенностям. С середины 30-х годов вплоть до нашего времени было предложено много различных классификаций воды в горных породах, но наиболее обоснованной является классификация Р.И. Злочевской (1988), согласно которой вода в горных породах может относиться к трем категориям: связанной, переходного типа и свободной (табл. 1).

Согласно этой классификации, связанная вода удерживается в породе за счет химических и физических сил связи (с энергией 0,1 — 800 кДж/моль), действующих со стороны поверхности минералов и

Таблица 1. Классификация воды в горных породах (по Р.И. Злочевской, 1988)

Категория (тип) воды	Вид и разновидность воды
1. Связанная вода	1. Вода кристаллической решетки минералов (конституционная, кристаллизационно-связанная) 2. Адсорбционная вода (мономолекулярной и полимолекулярной адсорбции)
2. Вода переходного типа (от связанной к свободной)	1. Осмотически-поглощенная вода 2. Капиллярная вода (капиллярной конденсации и капиллярного впитывания)
3. Свободная вода	1. Замкнутая в крупных порах 2. Текучая

изменяющих структуру и свойства воды. Она бывает двух видов (см. табл. 1). К первому относится вода, входящая в состав кристаллических решеток различных минералов. Это так называемая конституционная, немалекулярная форма воды типа ОН-групп, кристаллизационная вода различных кристаллогидратов (если они есть в данной горной породе), а также вода, “связанная” координационно-ненасыщенными атомами и ионами кристаллической решетки минералов. Ко второму виду относится адсорбционная вода, образующаяся за счет адсорбционного “притяжения” молекул воды к активным адсорбционным центрам поверхности минералов. Среди нее выделяются две разновидности: а) с наибольшей энергией притяжения к поверхности (около 40 — 120 кДж/моль) — вода мономолекулярной адсорбции и б) с меньшей энергией связи (<40 кДж/моль) — вода полимолекулярной адсорбции. Связанная вода образует адсорбционные пленки толщиной в один или несколько молекулярных слоев и в горных породах содержится в порах или микротрещинах размером менее 0,001 мкм. У этого типа воды физические свойства в наибольшей степени отличаются от свободной.

Вода переходного типа (от связанной к свободной) в меньшей степени подвергается действию поверхностных сил, она удерживается вблизи поверхности минералов за счет более слабых связей. Поэтому ее структура менее искажена, а отличия в физических свойствах по сравнению со свободной водой менее значительны или почти не существенны. В пределах этого типа выделяется два вида воды (см. табл. 1): осмотически-поглощенная и капиллярная. Первый вид образуется в горных породах за счет процессов избирательной диффузии молекул воды в направлении к минеральной поверхности, обусловленной наличием у последней “ионной

атмосферы” — так называемого двойного электрического слоя, состоящего обычно из катионов порового раствора, “компенсирующих” отрицательный заряд минеральных частиц (рис. 5). Двойной электрический слой имеет две части (см. рис. 5): внутреннюю, называемую адсорбционным слоем (*c*), и внешнюю — диффузный слой (*d*). Концентрация катионов экспоненциально увеличивается по нормали к минеральной поверхности и это обуславливает наличие градиента концентрации, вызывающего “осмотическое” передвижение молекул воды из объема свободного порового раствора (*e*) в пределы двойного электрического слоя (*d*). Образующаяся таким образом осмотическая вода занимает внешнюю часть двойного электрического слоя — диффузный слой (*d*). “Осмотической” эту воду называли потому, что ее образование связано с явлением микроскопического поверхностного осмоса, напоминающего обычный макроскопический осмос — движение воды через полупроницаемую мембрану (то есть пропускающую относительно малые по размеру молекулы воды, но не пропускающую более крупные катионы) под действием градиента концентрации (хорошо известна роль подобных “мембран” в клетках многих животных организмов, тоже содержащих “осмотическую воду”). В горных породах роль этой “полупроницаемой мембраны” выполняет внешняя граница двойного электрического слоя (см. рис. 5). С этой категорией воды тесно связана способность многих глинистых пород набухать — увеличивать свой объем при впитывании влаги.

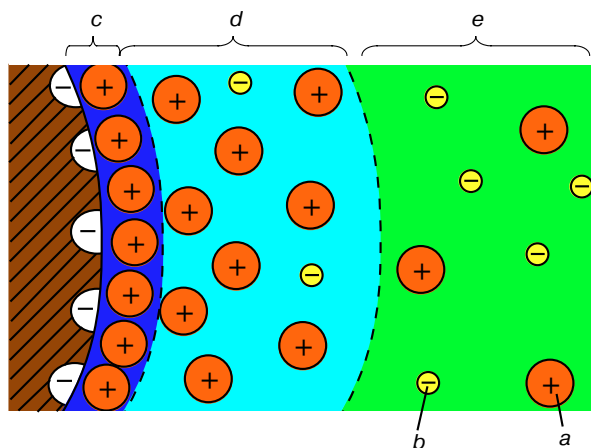


Рис. 5. Образование осмотически-поглощенной воды вблизи отрицательно заряженной минеральной частицы:

a — катионы; *b* — анионы; *c* — область адсорбционного слоя, занятая прочносвязанной водой; *d* — диффузная часть двойного электрического слоя, занятая осмотической водой; *e* — область за пределами двойного электрического слоя, занятая свободной водой.

Второй вид воды переходного состояния (см. табл. 1) — это капиллярная вода. Она образуется в порах капиллярного размера (диаметром от 10^{-3} до 10^3 мкм) за счет капиллярного давления и удерживается в горной породе капиллярными силами водных менисков (силами поверхностного натяжения), образующихся на границе фаз вода—воздух—твердая поверхность. Капиллярные силы практически не меняют структуры воды и поэтому капиллярная вода по основным физическим свойствам практически не отличается от свободной. Она может формироваться в горных породах двояко: 1) за счет так называемого явления капиллярной конденсации, когда молекулы воды постепенно конденсируются на поверхности пленки адсорбированной влаги, обволакивающей частицы породы, и, сливаясь в местах контакта (на стыке частиц), образуют водные мениски (рис. 6*a*); 2) за счет капиллярного впитывания воды по сообщающимся порам, трещинам и каналам при контакте породы со свободной водой (рис. 6*б*).

К третьему типу относится собственно свободная вода (см. табл. 1), обладающая физическими свойствами обычной воды. В горных породах она делится на два вида: 1) вода замкнутая (иммобилизованная) в крупных порах породы и поэтому не участвующая в процессах фильтрации и движении подземных вод и 2) текущая свободная вода (вода грунтового потока).

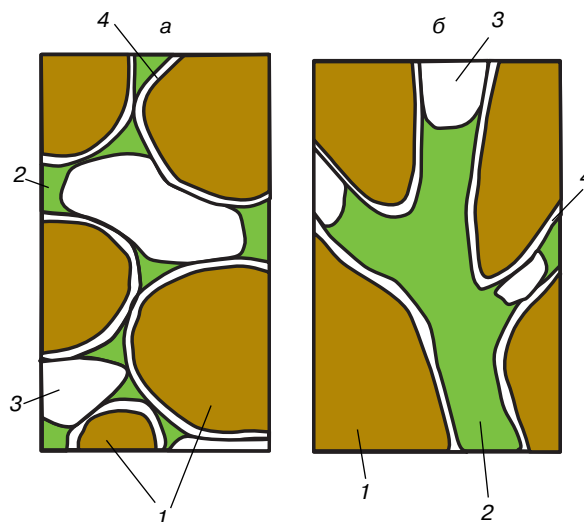


Рис. 6. Состояние капиллярной воды в горных породах:

a — капиллярно-конденсированная вода; *б* — собственно капиллярная вода; 1 — минерал, 2 — капиллярная вода, 3 — воздух, 4 — адсорбционная вода.

ВЛИЯНИЕ ВОДЫ НА СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Различные категории воды, находящейся в горных породах, существенно влияют на многие свойства пород. Практически все свойства горных пород меняются в той или иной степени в зависимости от наличия в них связанной воды определенного вида. Но наиболее важно с практической точки зрения ее влияние на состояние пород, процессы тепломассопереноса в них, а также на их деформируемость и прочность. Влияние связанной воды на состояние пород наиболее сильно проявляется у дисперсных, состоящих из отдельных частиц, горных пород, особенно таких, как глинистые и лёссовые. Это объясняется тем, что дисперсные горные породы обладают большой величиной удельной поверхности (суммарной площадью поверхности единицы массы породы, измеряемой в квадратных метрах на 1 г), достигающей в некоторых глинах 600 – 800 м²/г. А поскольку количество связанной воды в породе в первом приближении пропорционально ее удельной поверхности, то становится понятным, почему именно в глинах содержится больше всего связанной воды.

Глинистые породы предрасположены к воде и всегда содержат связанную воду. Если в них присутствует только адсорбционная вода, то они представляют собой довольно прочные породы твердой консистенции. При наличии в них осмотической и капиллярной воды они приобретают свойство пластичности, податливости, липкости, капиллярной связности, легко деформируются и резко теряют за счет увлажнения свою прочность. При наличии в глинах свободной воды они приобретают свойство текучести и ведут себя как жидкообразные тела.

Большое влияние связанная вода оказывает на процессы тепломассопереноса в породах. Поскольку она прочно удерживается в тонких порах и микротрещинах и к тому же обладает повышенной вязкостью, “сдвинуть” эту воду чрезвычайно трудно, она не подчиняется обычным законам фильтрации, осуществляемой под действием гидродинамического напора. Для того чтобы “сдвинуть” эту воду, вовлечь в фильтрационный поток, необходимо преодолеть ее “сопротивление”, при этом фильтрация начинается лишь после превышения напором так называемого “начального градиента фильтрации”. Поэтому глины и являются обычно водоупором, не пропускающим грунтовые воды или фильтрующим сквозь себя воду очень медленно. Роль связанной воды в подобных глинистых экранах еще до конца не изучена, остается много нерешенных проблем, в частности раскрывающих экологическое значение связанной воды в земной коре.

Аномальные теплофизические свойства связанной воды влияют и на процессы теплопереноса в породах. Кроме того, наличие определенного количества незамерзшей связанной воды в мерзлых горных породах обуславливает возможность ее участия

в массопереносе при отрицательных температурах, а также сильно влияет на фазовые превращения вода–лед. Важной чертой при этом является наличие фазовой поверхности раздела между льдом и жидкой незамерзающей прослойкой, контактирующей с противоположной стороны с твердой минеральной поверхностью породы (рис. 7). Передвижение незамерзшей воды в такой породе сопровождается сложными процессами перекристаллизации, которые могут приводить к возникновению и росту давления в незамерзших пленках воды, являющегося одной из причин морозного пучения грунтов. Особую сложность эти процессы приобретают в засоленных грунтах, для которых они пока полностью не изучены.

Очень сильно связанная вода влияет на прочность и деформируемость практически любых горных пород. Она оказывает “расслабляющее и размягчающее” действие на многие горные породы, приводит к понижению их прочности и увеличению деформируемости. Характерным примером ее влияния в этом отношении являются лёссовые породы. Эти породы, в отличие от глинистых, не предрасположены к воде, они широко распространены в сухих, аридных областях на юге России, Украины, Средней Азии. В них содержится главным образом

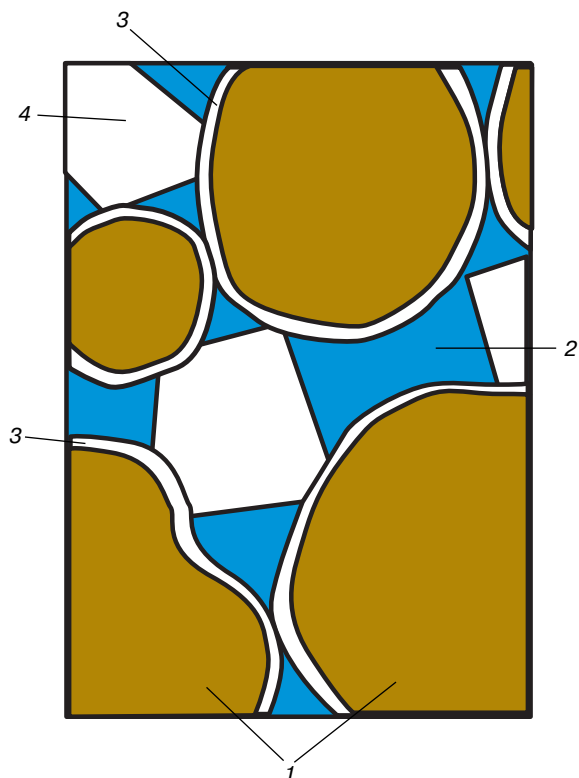


Рис. 7. Состояние незамерзшей воды в горных породах:

1 – минеральная частица, 2 – лед, 3 – пленка незамерзшей воды, 4 – воздух.

только адсорбционная связанная вода и частично капиллярная, заполняющая лишь самые тонкие микропоры и микрокапилляры в породе. При этом лёссы обладают достаточной прочностью, так что способны “держат” крутые, почти вертикальные стенки естественных обнажений высотой в десятки метров. Но стоит в лёссы проникнуть достаточному количеству воды, например при подтоплении массива или в результате утечек воды, то лёссовая порода чрезвычайно быстро переходит в пластичное состояние, резко теряет прочность и проседает в результате доуплотнения даже под собственным весом.

Однако было бы неверно думать, что связанная вода влияет лишь на прочность осадочных дисперсных пород. Не в меньшей мере ее влияние сказывается на деформировании и прочности магматических, метаморфических и сцементированных осадочных горных пород. Наличие связанной воды в кристаллической решетке минерала снижает его упругость. Но в еще большей степени на деформируемость и прочность таких пород влияет наличие в микротрещинах, на контактах зерен или кристаллов адсорбционных пленок связанной воды. Они понижают поверхностную энергию минералов горной породы и тем самым облегчают развитие в породе различных механических микронарушений, дислокаций, микротрещин и т.д., особенно в том случае, если порода находится под напряжением. Вследствие этого порода начинает “ползти”, она деформируется с той или иной скоростью при том же самом постоянном напряжении. Это одна из форм проявления так называемого эффекта Ребиндера¹ — эффекта облегчения пластической деформации тел различной природы и снижения их прочности за счет явления адсорбции. Ускорение ползучести горных пород в условиях действия адсорбционных сред отмечалось неоднократно. Этот процесс широко развит в природе и целенаправленно используется человеком. Наиболее характерно он проявляется в условиях так называемой “наведенной сейсмичности” — активизации сейсмической активности территории в зоне влияния водохранилища после начала его затопления и возникновения искусственных землетрясений силой до 5 — 7 баллов. Происходящее после заполнения водохранилища просачивание по тонким порам и трещинам связанной воды в прилегающие массивы горных пород вызывает понижение поверхностной энергии слагающих их минералов. При этом в напряженных горных породах интенсивно начинают развиваться дислокации и растут микротрещины. За счет этого происходит релаксация напряжений в массиве, их ослабление, что выражается макроскопически в виде сейсмических колебаний массива в целом и сброса напряжений. Процесс этот носит кинетический характер, свя-

занная вода очень медленно проникает вглубь массива, и к тому же разные минералы в горных породах избирательно проявляют эффект Ребиндера. По этим причинам наведенная сейсмичность затухает обычно долго, в течение 3 — 5 лет. Однако этот пример не единственный. Практически все горные породы (в том числе магматические и метаморфические) можно рассматривать как дисперсные системы, то есть имеющие большую удельную поверхность, образованную внутренними границами раздела между минеральными фазами одинакового или разного состава. В последнее время учеными установлено, что связанная вода может внедряться в поликристаллические скальные породы по этим сплошным межзеренным и межфазным границам и оставаться там неопределенно долгое время. Такая “межзеренная пропитка” наиболее вероятна в породах, для которых наблюдается полное смачивание свободной поверхности водой, а также происходит снижение прочности породы не менее чем вдвое. С ростом температуры и напряжений круг пород, в которых проявляется данный эффект, еще больше расширяется.

Приведенный материал показывает, какую большую роль играет связанная вода в формировании свойств различных горных пород, а значит, и в развитии многих геологических процессов. В одной статье нет возможности привести все многочисленные данные, которые накоплены к настоящему времени о свойствах связанной воды. Дополнительные сведения читатели смогут найти в приводимой ниже литературе. Нет сомнения в том, что в ближайшее время будет достигнут еще больший прогресс в исследовании связанной воды в горных породах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Овчаренко Ф.Д. и др. Вода в дисперсных системах. М.: Химия, 1989. 288 с.
2. Злочевская Р.И., Королев В.А. Электроповерхностные явления в глинистых породах. М.: Изд-во МГУ, 1988. 177 с.
3. Поверхностные пленки воды в дисперсных структурах. / Под ред. Е.Д. Шукина. М.: Изд-во МГУ, 1988. 279 с.

* * *

Владимир Александрович Королев, инженер-геолог, грунтовед, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии и охраны геологической среды Геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Опубликовал более 150 научных работ, в том числе ряд монографий, учебников и учебных пособий. Основные направления научных исследований — термодинамика грунтов, электроповерхностные и физико-химические свойства грунтов, мониторинг геологической среды, экологическая геология.

¹ Петр Александрович Ребиндер (1898 — 1972) — физико-химик, академик, автор открытого и описанного им явления понижения прочности твердых тел под действием ПАВ.