Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 2, 1974 г.

ГИДРОТЕРМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ЗЕМЛИ

Доктор геол.-мин. наук Н. И. ТОЛСТИХИН
(Ленинградский горный ин-т)

Вода является основной движущей силой неорганической жизни Земли. Состояние, структура, свойства и состав воды зависят от ее температуры. Температура поверхностных и подземных природных вод Земли изменяется в очень больших пределах и подчиняется широтной климатической, высотной орографической и глубинной зональностям. Отсюда чрезвычайное разнообразие природных вод и их взаимодействия с оболочками Земли.

При рассмотрении гидротермической зональности Земли для выделения гидротермических поясов, гидротермических зон, а при необходимости и гидротермических подзон, следует остановиться предварительно на классификации природных вод по температуре. Одной из ранних таких классификаций подземных вод является классификация А. М. Овчинникова [9], согласно которой выделяются воды: а) весьма холодные (0—4° С); б) холодные (4—20° С); в) теплые (субтермальные) (20—37° С); г) «гомотермальные» (37—42° С); д) горячие воды (42—100° С); е) перегретые (свыше 100° С).

Год спустя, в 1964 г., была опубликована более совершенная и обоснованная классификация вод по температуре Б. Ф. Маврицкого [7]. В ней хорошо разработано подразделение холодных, термальных и перегретых вод, а также выделены воды переходной зоны с температурой от 374 до 425° С и зона парообразных—газообразных вод.

В предложенной в 1970 г. нашей классификации нашли отражение отрицательнотемпературные воды — криопэги, холодные воды — пэги, теплые и горячие воды — субтермы и термы, перегретые сверхгорячие воды и горячие пары [13]. Совместно с О. К. Ланге в 1971—1972 гг. в этой классификации были уточнены некоторые температурные градации и терминология.

В настоящей статье приводится несколько видоизмененная классификация О. К. Ланге и Н. И. Толстихина:

Криопэги	<—36° С	Сверххолодные — гиперкриопэги
	—36—(—23)	Исключительно холодные — гиперкриопэги
	—23—(—8)	Очень холодные — эпикриопэги
	—8—(—2)	Холодные — мезокриопэги
	—2—0	Умеренно холодные — протокриопэги
Пэги	0—4	Очень холодные — эпипэги
	4—20	Холодные — мезопэги
	20—35	Прохладные — протопэги

Термы	35—55	Низкотемпературные — прототермы
	55—75	Среднетемпературные — мезотермы
	75—100	Высокотемпературные — эпитермы
Гипертермы	100—150	Низкотемпературные — протогипертермы
	150—250	Среднетемпературные — мезогипертермы
	250—375	Высокотемпературные — эпигипертермы
Атмогидротермы	375—500	Низкотемпературные — протоатмогидротермы
	500—600	Среднетемпературные — мезоатмогидротермы
	600—700	Высокотемпературные — эпиатмогидротермы
Атмотермы	700—800	Низкотемпературные — протоатмотермы
	800—1000	Среднетемпературные — мезоатмотермы
	1000—1200	Высокотемпературные — эпиатмотермы
Диссоциаты воды	Выше 1200	

Как видно, природные воды по температуре подразделяются на следующие основные группы: криопэги, или отрицательнотемпературные воды; пэги — холодные воды, термы — горячие воды; гипертермы, или перегретые воды, атмогидротермы — горячие пары и воды; атмотермы — горячие пары воды и, наконец, диссоциаты воды.

С изменением температуры воды меняются ее структура и состояние [1]. С понижением температуры воды ниже нуля пресная вода переходит в твердое состояние — лед. Наряду со льдом при отрицательных температурах могут существовать и капельножидкие воды — соленые и рассолы. При этом минерализация и состав отрицательнотемпературных вод (криопэгов) меняется с понижением температуры, что позволяет среди криопэгов выделить пять групп [13].

Первый пояс — пояс отрицательнотемпературных вод, исходя из сказанного, можно разделить на две зоны: а) зону льдов; б) зону криопэгов.

Второй гидротермический пояс — пояс положительнотемпературных вод подземной гидросферы (0—375° С) может подразделяться на три зоны: а) холодных вод — пэгов; б) горячих вод — терм; в) сверхгорячих «перегретых» вод — гипертерм [2]. Каждая из названных групп, в свою очередь, подразделяется на три подзоны. Температура 375° С близка к критической температуре воды.

Третий — гидротермический пояс (375—700° С) является переходным между поясом капельножидких вод и вод в парообразном состоянии. Это пояс атмогидротерм. В его пределах выделяются три подзоны: низко-, средне- и высокотемпературных атмогидротерм. К первой подзоне относится, по С. М. Григорьеву [3], «дренажная оболочка Земли» с пределами температур 375—450° С и, по Ф. А. Макаренко и В. Г. Поляк [8], «переходная зона» с интервалом 375—425° С.

Глубже пояса атмогидротерм располагается мощный четвертый пояс атмотерм (700—1200° С) — преобладания горячего пара — газа с диссоциатами воды. Содержание последних увеличивается по мере нарастания температуры. Мощность этого пояса очень велика, и ресурсы горячего пара огромны.

На еще больших глубинах располагается самый нижний — пятый гидротермический пояс — диссоциатов воды, для которого характерно наряду с газовой фазой преобладание воды в состоянии, диссоциированном на Н и ОН. Это царство водорода. Намечаемый верхний температурный предел пятого пояса в 1200° С весьма условный и предварительный.

В чем же состоит гидротермическая зональность природных вод? Широтная зональность природных вод заключается в том, что в поляр-

ных странах сосредоточиваются зона льдов и зона криопэгов. Здесь они достигают своего наибольшего развития. В Арктике и симметрично в Антарктике располагаются два пояса отрицательнотемпературных вод. Вместе с тем намечается и их антисимметрия. Так, в Арктике преобладают поверхностные криопэги Северного Ледовитого океана, мощность слоя которых превышает четыре километра. Льды ледников Гренландии, Новой Земли, Северной Земли и другие занимают здесь меньшую площадь, чем ледники Антарктиды. На Антарктиде же, наоборот, ледники занимают огромную территорию.

Наряду с поверхностными в пределах Арктики и Антарктики развитие получили мерзлая зона и зона подземных криопэгов. Лучше изученный пояс отрицательных температур подземных вод Арктики характеризуется тем, что мерзлая зона его островов и континентов меньше зоны криопэгов. Зона криопэгов в пределах Сибири выходит далеко за пределы Арктики на юг, опускаясь в бассейне р. Вилюй до 62° с. ш. Мощность пояса отрицательных температур доходит в Якутии до 1500 *м*.

К югу от первого пояса — отрицательных температур располагается второй пояс — положительных температур, его зона пэгов с подзонами очень холодных, холодных и прохладных вод. Подзоны эти сменяют одна другую по направлению к экватору. В пределах экватора и прилегающих территорий находятся наиболее теплые грунтовые воды — протопэги.

От Антарктиды на север по океаническому дну прослеживается зона криопэгов, которая местами распространяется до 60 и 45° ю. ш. Далее по направлению к экватору прослеживаются пэги, в основном эпипэги с температурой 0—4° С и несколько выше.

В пределах приповерхностных слоев жидкой и твердой оболочек Земли прослеживаются два гидротермические пояса: отрицательнотемпературных вод в полярных и приполярных странах; пояс положительнотемпературных вод, именно его зона пэгов, расположенная в умеренных и приэкваториальных широтах.

Высотная — орографическая гидротермическая зональность выражается в последовательном снижении температуры природных вод снизу вверх от подошвы горных сооружений к водоразделам и вершинам гор. При этом можно выделить следующие основные типы высотной гидротермической зональности.

Тип I. От подошвы гор до их вершин прослеживается лишь один пояс положительнотемпературных вод — пэгов. В случае наиболее полного гидротермического разреза протопэги сменяются вверх по склонам мезопэгами и ближе к водоразделам — эпипэгами. Подобный тип разреза характерен для низких широт. В высоких широтах подзона протопэгов выпадает, а для еще более высоких широт выпадает и подзона мезопэгов

Тип. II. От подошвы гор до их вершин прослеживается лишь один пояс отрицательнотемпературных вод — мерзлая зона, а в отдельных случаях на вершинах гор появляются ледники.

Тип III. Нижняя часть склонов гор находится в пределах пояса положительнотемпературных вод (зоны пэгов), а верхняя часть склонов и водоразделы — в пределах пояса отрицательных температур, его мерзлой зоны, а иногда и ледников (Памир).

Тип IV. В основании гор мерзлая зона, а на их вершинах зона пэгов пояса положительнотемпературных вод. Этот тип разреза можно назвать аномальным. Он наблюдается при инверсии температур.

Глубинная зональность природных вод заключается, как правило,

в постепенном нарастании температур вод с глубиной, в смене гидро термических поясов и зон [2, 4]. При этом в высоких и арктических ш ротах первый с поверхности Земли пояс отрицательнотемпературны вод — мерзлой зоны и криопэгов сменяется на глубине поясом пэго начиная с нулевых температур и включая подзоны эпипэгов, мезопэго и протопэгов. Далее вглубь следуют зона терм, зона гипертерм и д В низких широтах пояс отрицательнотемпературных вод отсутстве и гидротермический разрез планеты начинается с зоны пэгов пояса по ложительных температур, а далее в глубину происходит последовател ное нарастание температур и соответственно смена поясов и составляю щих их гидротермических зон.

С повышением температуры и сменой гидротермических поясо и зон изменяется структура и состояние воды и характер ее взаимодей ствия с вмещающими породами [5]. Эта большая проблема только по ставлена в порядок дня и требует всесторонней разработки. Остановим ся на некоторых примерах. При достижении 100—150° С отделяютс физически связанные воды, а при соответствующих давлениях (1— 2,5 *кбар*) песчано-глинистые породы превращаются в хлорит-гидрослю дистые сланцы фации аспидных сланцев и вулканогенные породы пре образуются в зеленокаменные [15].

В условиях регионального метаморфизма с ростом температу с глубиной и сменой гидротермических поясов и зон происходит зональ ное размещение фаций метаморфизма. В интервале 1—3 *кбар* и 100— 800° С происходит смена фаций: низкотемпературная цеолитовая, соо ветствующая зоне низкотемпературных гипертерм, сменяется фациям роговиков и, наконец, фацией пироксено-роговиковой, соответствующе зонам средне- и высокотемпературных атмогидротерм (500—700° С) При значительном возрастании давлений (1—9 *кбар*) в интервале 100— 800° С цеолитовая фация переходит через фации зеленых сланцев в ам фиболитовую, гранулитовую, а в пределах очень высоких давлений — в эклогитовую. Так фации регионального метаморфизма согласуютс [15] с гидротермальными зонами и поясами в условиях переменног давления [5]. Так же подчиняется гидротермической зональности разме щение гидротермальных месторождений [12]. Низко- и среднетемпера турные месторождения (ниже 300° С) формируются в зоне терм и в пояс се гипертерм, а высокотемпературные — в основном относятся к поясу атмогидротерм, к его подзоне протоатмогидротерм (300—500° С). Раст воряющая способность воды сильно меняется в зависимости от темпе ратуры, как это хорошо известно из физической химии. Следует обра тить внимание на воду при 300° С. При температуре до 300° С вод является основанием, а при температуре выше 300° С она приобретае свойства кислоты и способна вытеснять кремнекислоту и углекислоту из их соединений [4]. Эти свойства воды имеют огромное значение пр формировании и разрушении месторождений, формировании свойст горных пород, происходящем различно в условиях щелочной и кисло водной среды.

Теснейшим образом связана структура воды с ее температурой. В льду все молекулы воды связаны между собой водородными связями. При плавлении льда часть водородных связей разрушается, вода при обретает сложную структуру. Она состоит из мономерной, сложнопо строенной — ассоциированной и весьма сложнопостроенной — струк туированной воды [5]. Между указанными формами воды устанавли вается подвижное равновесие, которое зависит от состава, минерали зации, взаимодействия воды с породами и минералами, от давления и температуры. С ростом температуры это равновесие сдвигается в сто-

ону мономерных молекул. Наиболее резко изменяется структура воды при температуре около 4, 35, 55, а также 100, 375, 700, 1200° С [10].

В пределах пояса нэгов и терм в основном существует структурированная вода. Ее активность повышается за счет растворенных в ней кислорода и углекислоты. Геохимическая роль воды очень велика [11]. С повышением температуры соотношения между структурированной и ассоциированной водой изменяются в пользу ассоциированной. Вместе с тем увеличивается роль мономерной воды.

В поясе гипертерм увеличивается содержание мономерной воды, давление пара достаточно велико, процесс структурирования отмирает. В низкотемпературной подзоне пояса атмогидротерм выявляется тенденция к дальнейшему понижению структурированности воды, но вода еще сохраняет свое значение как химический реагент и переносчик ионов. Входя в состав минералов, она увлекает с собой и находящиеся в ней ионы. Поэтому для минералов этого пояса типичен разнообразный набор катионов и элементов-примесей. В подзоне среднетемпературных атмогидротерм (500—600° С) в реакциях еще широко участвует ассоциированная вода и в меньшей степени структурированная. Последняя с ростом температуры разрушается. Вода еще достаточно активна, входит в состав минералов. Существующее равновесие в структуре растворов нарушается вследствие диссоциации и отщепления гидроксилов, происходит выпадение ионов щелочных металлов [5].

Интервал температур, присущий высокотемпературным атмогидротермам (600—700° С), является спорным для выделения верхнего температурного предела химически активной воды. Для него еще характерно некоторое количество ассоциатов воды при преобладании воды мономерной. При более высоких температурах, присущих поясу атмотерм — поясу горячего пара, вода является высокодиссоциированной жидкостью — флюидом, выступающим как участник реакций, не взаимодействующий химически. Расчеты А. А. Штернберга [17] показывают, что при таких высоких температурах возможна лишь мономерная вода и вода, диссоциированная на ионы водорода и гидроксила. Ассоциаты воды разрушаются.

Отсутствие водородных связей придает воде другие особенности, выражающиеся в образовании летучих соединений типа гидроксилов, комплексных соединений и полимеров, двойных хлоридов. Обладающие большой упругостью пара легколетучие соединения по свойствам подобны воде. Образующийся в поясе атмотерм флюид представляет среду с некоторыми сгущениями молекул и диссоциатов воды около растворенных ионов. Высокая миграционная способность этого флюида обусловлена его малой вязкостью [5]. При более высоких температурах, характерных для самого глубокого пояса — диссоциатов воды, изменяются состояние и свойства вод пояса. Они требуют своего изучения.

Выше охарактеризована широтная, высотная и глубинная гидротермическая зональность Земли; дана лишь схема этой зональности, рассмотрены фрагментарно некоторые вопросы. Над гидротермической зональностью нашей планеты нужно еще много работать. Наблюдаемые наряду с зональными гидротермическими закономерностями и гидротермические аномалии [14, 16] нарушают как широтную, высотную, так и глубинную зональности. Гидротермические аномалии вызываются различными причинами. Одной из основных является перемещение подземных вод. Восходящие потоки подземных вод создают положительные тепловые аномалии, подчеркивая иногда очаги разгрузки глубоких вод. Отрицательные аномалии указывают на внедрение холодных вод в глубокие горизонты и намечают области питания водоносных горизонтов.

Причиной широтной гидротермической зональности является в о
новном климат планеты и его изменения, причиной высотной зональн
сти в основном является рельеф и, наконец, причиной глубинной гидр
термической зональности — сочетание внешних и внутренних фактор
тепловой жизни планеты.

Цель настоящей статьи — обратить внимание специалистов на н
обходимость дальнейшей разработки проблемы гидротермической з
нальности Земли. Приведенные здесь температурные пределы ориент
ровочны и подлежат дальнейшему обоснованию и обсуждению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блох А. М. Структура воды и геологические процессы. «Недра», М., 1969.
2. Богородицкий К. Ф. Некоторые данные о перегретых водах и их распр
странении на территории СССР. Гидрогеотермические условия верхних частей земн
коры. «Наука», М., 1964.
3. Григорьев С. М. Роль воды в образовании земной коры. «Недра», М., 19
4. Илларионов И. К. Природная вода в геосферах в зависимости от терм
динамической обстановки. Тезисы докладов второго совещания по геотермическим и
следованиям в СССР. «Наука», М., 1964.
5. Ильин В. А. Состояние и свойства воды в глубоких горизонтах земной кор
Изв. вузов. Геология и разведка, 1972, № 10.
6. Ланге О. К., Толстихин Н. И. О температурной классификации во
Труды Моск. об-ва испыт. природы. Изд. МГУ, 1973.
7. Маврицкий Б. Ф. Классификация подземных вод по температурному пр
знаку. Тр. ВСЕГИНГЕО. Новая серия, 1964, вып. 9.
8. Макаренко Ф. А., Поляк В. Г. Тепловой режим недр СССР. Тр. гео
ин-та АН СССР, вып. 218, 1970.
9. Овчинников А. М. Минеральные воды. Госгеолтехиздат, М., 1963.
10. Питьева К. Е. Подземные воды палеозоя северного Прикаспия. Изд. МГ
1971.
11. Сауков А. А. Геохимия. Изд. МГУ, 1966.
12. Татаринов П. М., Бетехтин А. Г. Курс месторождений полезных иск
паемых. «Недра», М., 1964.
13. Толстихин Н. И. Классификация природных минеральных вод по тем
ратуре. Изв. вузов. Геология и разведка, 1970, № 3.
14. Фролов Н. М. Гидрогеотермия. «Недра», М., 1968.
15. Хорева Б. Я. Полиметаморфические комплексы докембрийского фундам
та фанерозойских складчатых областей. Автореф. канд. диссерт. ВСЕГЕИ, Л., 1971.
16. Череменский Г. А. Геотермия. «Недра», Л., 1972.
17. Штернберг А. А. Состояние воды в надкритической области в свя
с проблемами глубинного минералообразования. Геология рудничных месторожден
1962, № 5.