Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXII, вып. 2, 1971 г.

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ОБЛАСТИ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ И ДАЛЬНЕЙШЕЕ ИХ ИЗУЧЕНИЕ

В. М. Максимов

Многолетнемерзлые горные породы на территории СССР встречаются в районах с различным геоморфологическим и геолого-структурным строением и занимают 49,7% территории страны. В разрезе любого района ясно прослеживаются три зоны.

Первая сложена почвами и подстилающими их разновозрастными, различного генезиса горными породами, меняющими в годовом разрезе знак температуры — зона деятельного слоя (ДС). Мощность зоны колеблется от сантиметров до 3—5 *м*.

Вторая сложена различными по возрасту, происхождению, литологическому и петрографическому составу горными породами, обладающими отрицательными температурами — зона многолетнемерзлых горных пород (ЗММГП). Эта зона в одних районах может быть сплошной, в других — нарушенной положительно-температурными очагами различных форм и очертаний в разрезе и по площади. К таким очагам относятся талики, тектонические трещины, карстовые каналы, полости и пещеры в карстующихся породах и подземных льдах с циркулирующими положительно-температурными подземными водами. Однако по таликам, каналам и трещинам часто циркулируют и отрицательно-температурные межмерзлотные соленые воды *. Мощность зоны зависит от географического положения района, его физико-географических, геолого-структурных, гидрогеологических условий, геологической истории развития района, его палеоклимата и особенно от истории формирования самой зоны мерзлых пород в четвертичное время. Для области мерзлоты в целом ЗММГП возрастает в северном направлении, достигая местами (Усть-Вилюй, Тикси и др.) 500—650 *м*; в отдельных же пунктах (верховье Мархи) глубокое охлаждение горных пород прослеживается даже на глубине 1500 *м*.

Третья зона сложена различными горными породами с положительными температурами, формирующимися за счет солнечной радиации и внутреннего тепла Земли — зона положительно-температурных горных пород (ЗПТГП).

В последние 35—40 лет развитие гидрогеологии области мерзлоты шло по линии разработки и научного обоснования классификации подземных вод, изучения специфических особенностей гидрогеологии районов мерзлоты [29], химии и динамики над-, меж- и подмерзлотных вод, роли их в мерзлотных явлениях, для водоснабжения, поисков нефти и

* Такие воды можно назвать, по Н. И. Толстихину [30], криопэгами.

газа при эксплуатации твердых и россыпных месторождений полезных ископаемых, картирования и районирования вод.

Классификация подземных вод и особенности гидрогеологии области мерзлоты. С рассмотренной зональностью мерзлых горных пород тесно связана классификация подземных вод, разработанная в 1933—1939 гг. Н. И. Толстихиным. Он выделяет надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные воды, залегающие, соответственно, в первой, второй и третьей зонах.

Воды ДС существуют в жидкой, твердой и парообразной фазах. Отличительной чертой вод ДС является чередование явлений их напорности и безнапорности в годовом разрезе.

Воды ЗММГП встречаются также в жидком, твердом и парообразном состоянии, причем последние обычно имеют распространение в карстовых каналах, трещинах, пустотах, в известняках, доломитах, гипсах и подземных льдах. Воды этой зоны являются напорными (в пластах горных пород, тектонических трещинах, зонах тектонической трещиноватости) и безнапорными (в сквозных таликах, карстовых полостях, не заполненных полностью водой).

Воды ЗПТГП встречаются преимущественно в жидкой фазе. Они составляют главную часть естественных ресурсов подземных вод области мерзлоты, являются пресными и минерализованными вплоть до рассолов, имеют разнообразный солевой и газовый состав, обладают напором и довольно постоянным режимом во времени.

Заметим, что исследование подземных вод различных районов области мерзлоты вот уже много лет ведется в соответствии с трехклассной классификацией, незыблемость которой объясняется тем, что она отражает мерзлотно-гидрогеологическую зональность, которая, как и географическая, почвенная, климатическая, является важнейшей особенностью той части литосферы, где развились мерзлые горные породы. Все последующие классификации подземных вод области мерзлоты не отрицают, а лишь детализируют и подтверждают научную обоснованность классификации Н. И. Толстихина.

Гидрогеология области многолетней мерзлоты имеет свои особенности, обусловленные физико-географическим, фильтрационно-гидродинамическим факторами, взаимодействием подземных вод с мерзлыми породами, фазовым переходом воды из одного состояния в другое, динамикой мерзлотного процесса и деятельностью человека.

1. Физико-географический фактор, прежде всего климат области многолетней мерзлоты, главным образом влияет на режим подземных вод, особенно первой и второй зон.

2. Фильтрационно-гидродинамический фактор — наличие в одних и тех же гидрогеологических разрезах районов и структур литологического и мерзлого водоупоров.

В структурах, в разрезах которых развит мощный мерзлый водоупор, наложившийся на литологические водоупоры и водоносные пласты и залегающий ниже общего базиса эрозии, не встречаются большие естественные ресурсы пресных вод, а распространены соленые воды и рассолы хлор-натриевого или хлор-кальциевого состава, условия выхода которых на поверхность затруднены. Эти структуры являются закрытыми, с ними бывают связаны месторождения нефти, газа, промышленно-ценных подземных вод. Водоносные горизонты обладают большими напорами, а скважины, вскрывающие их, незначительным дебитом (Оленекский, Якутский, Хатангский и другие бассейны). В этих условиях нет достаточных оснований говорить о регионально выдержанной гидродинамической зоне весьма интенсивного водообмена.

Если в разрезах структур развит прерывистый мерзлый водоупор, также наложившийся на литологические водоупоры и водоносные пласты и залегающий на уровне выше или ниже общего базиса, то в районах распространены талики различных форм и очертаний, являющиеся своеобразными очагами питания и разгрузки подземных вод различных типов (бассейны Ю. Якутии, Верхнеленский, южная часть Тунгусского). В подобных мерзлотно-гидрогеологических условиях могут быть выражены все три гидродинамические зоны: весьма интенсивного, затрудненного и весьма затрудненного водообмена. Если в разрезах нет выдержанных литологических водоупоров, обычно в долинах рек, где широко развиты аллювиальные отложения, то в районах распространены аллювиальные подмерзлотные воды с мерзлым верхним водоупором, почти всегда пресные, гидравлически связанные с реками (Южная Якутия, Забайкалье, Магаданская область и др.). На юге области мерзлой зоны, где мерзлые породы часто развиты лишь на склонах северной экспозиции долин рек, прослеживаются зоны весьма интенсивного, затрудненного и весьма затрудненного водообмена.

Наконец, если для района характерны сложное геолого-структурное строение, радиальные нарушения, интрузивные тела, внедрившиеся в толщи осадочных горных пород, то, несмотря на развитие в разрезах даже мощных литологических и мерзлых водоупоров, создаются благоприятные условия для выхода глубоких подземных вод на поверхность и образования малых, средних и больших наледей, особенно когда глубокие воды разгружаются в аллювиальные потоки в долинах рек. Гидродинамическая зональность этих районов еще не изучена. Можно лишь полагать, что верхняя зона интенсивного водообмена здесь регионально не распространена.

Большое значение для гидрогеологической оценки районов области мерзлоты и изучения региональной гидродинамической зональности имеют фильтрационные свойства пород, слагающих мерзлый водоупор. Мерзлые породы водопроницаемы [36], фильтрационные свойства их ухудшаются с понижением температуры и повышением содержания твердой фазы воды. Для изучения этих свойств требуются специальные исследования фильтрации пород в диапазоне их отрицательных температур, характерных для ЗММГП изучаемого района или гидрогеологической структуры.

3. Взаимодействие подземных вод непосредственно с мерзлыми горными породами, как физической средой. Мерзлые породы и подземные воды находятся в единстве и постоянной борьбе между собой. С одной стороны, наличием мерзлых пород в разрезах гидрогеологических структур объясняется значительное уменьшение естественных ресурсов пресных подземных вод, замедление их вертикальной и горизонтальной миграций, образование и существование отрицательно-температурных вод у нижней границы ЗММГП, своеобразие миграции микроэлементов и формирования водно-солевых ореолов рассеяния. С другой стороны, благодаря динамичности подземных вод и несомому ими теплу, замедляется процесс промерзания горных пород, в ряде районов формируются талики и подземные потоки в ЗММГП и т. д.

Вполне очевидно, что процесс взаимодействия подземных вод с мерзлыми породами в различных гидрогеологических структурах протекает по-разному, что объясняется неодинаковыми геологическим строением, теплофизическими свойствами пород и различной историей формирования самой мерзлой зоны в структурах.

4. Фазовый переход воды из жидкого состояния в твердое и парообразное и наоборот тесно связан с предыдущим фактором. В зависимости

от промерзания в зимний период прекращается питание надмерзлотных водоносных горизонтов за счет атмосферных вод, значительно ухудшаются условия питания многих межмерзлотных и подмерзлотных вод. Надмерзлотные и некоторые виды межмерзлотных вод из безнапорных становятся напорными, и в годовом разрезе их вполне можно считать напорно-безнапорными.

В зависимости от промерзания или оттаивания изменяются условия миграции микроэлементов, минеральных и коллоидных частиц в деятельном слое и таликах, о чем свидетельствует ряд исследований последних лет [18, 32].

5. Динамика мерзлотного процесса — единство и борьба двух противоположных явлений — аггрaдации и деградации мерзлоты. Она определяет специфические черты режима подземных вод области мерзлоты: уменьшение или увеличение во времени естественных ресурсов жидких подземных вод, изменение условий их питания и разгрузки, производительности водоносных горизонтов, их морфологии, фильтрационных свойств и т. д.

В настоящее время динамика мерзлотно-гидрогеологического процесса в гидрогеологических целях планомерно не исследуется, а результаты многочисленных термодинамических и теплофизических исследований в целях инженерного мерзлотоведения используются гидрогеологами недостаточно.

6. Деятельность человека (строительство различных сооружений, открытая разработка полезных ископаемых, вырубка леса, пожары и т. д.) нарушает естественный тепловой режим мерзлой зоны и приводит к формированию новых и изменению режима существующих водоносных горизонтов, возникновению других условий фильтрации. В частности, большое значение имеет разработка золотых россыпей с применением фильтрационно-игловой оттайки пород [5].

Все рассмотренные факторы проявляются не изолированно друг от друга, а во взаимосвязи.

Химия подземных вод. Химия подземных вод изучалась и изучается в настоящее время многими исследователями [1, 2, 4, 9—11, 14, 16, 17, 20, 23, 26 и др.]. В отдельных артезианских бассейнах и районах, в разрезах которых отсутствуют соленосные, гипсоносные горные породы, установлена следующая гидрохимическая зональность вод сверху вниз: гидрокарбонатные кислородные, смешанные азотно-метановые, хлоридно-натриевые или хлор-кальциевые метановые с повышенным содержанием тяжелых углеводородов, а также Br, J, Sr и других микроэлементов. В районах с немощной мерзлой зоной гидрохимическая зональность согласуется с гидродинамической: гидрокарбонатные воды распространены в зоне интенсивного водообмена, смешанные — в зоне затрудненного водообмена, хлор-натриевые и хлор-кальциевые—в зоне весьма затрудненного водообмена или застоя вод. Эта связь имеет очень большое практическое значение, так как воды первой зоны обычно пригодны для водоснабжения, второй — используются для водоснабжения и поисков полезных ископаемых, третьей для поисков нефти, газа и минеральных промышленно-ценных подземных вод.

Микрокомпонентный состав подземных вод области мерзлоты изучен недостаточно. Гидрохимические исследования А. И. Перельмана, Н. П. Чибисова, В. Н. Макарова, В. П. Боровицкого и некоторых других геологов свидетельствуют о том, что зона мерзлых пород не является преградой для миграции микроэлементов и формирования водно-солевых ореолов рассеяния, что, по-видимому, объясняется содержанием в мерзлых породах пленочной воды, движение которой по [36] подчиняется

принципу термовлагопроводности. Это положение является еще дискуссионным, требующим специальных исследований. Установлено, что в таликах, даже изолированных, при промерзании между льдом и водой возникает разность потенциалов, в результате чего процесс миграции влаги и вместе с ней ионов некоторых элементов от талых пород к мерзлым идет наиболее интенсивно.

Динамика подземных вод. Вопросами динамики подземных вод области мерзлоты занимались многие исследователи [3, 5, 11, 19, 24, 28, 36 и др.]. Однако крупных работ, особенно по изучению динамики гравитационных вод при опробовании межмерзлотных и подмерзлотных горизонтов, нет. Если для надмерзлотного потока формулы Н. И. Толстихина приближенно учитывают сезонные промерзание и оттаивание, то для межмерзлотных и подмерзлотных вод все расчеты ведутся по формулам обычной динамики подземных вод, без учета влияния зоны мерзлоты и ее режима. Влияние же это, особенно для межмерзлотных и подмерзлотных аллювиальных и пластовых вод, контактирующих с нижней поверхностью зоны мерзлоты, может оказаться весьма существенным как для оценки запасов подземных вод, так и для определения дебитов скважин и притоков в различные горные выработки. При этом следует учитывать, что подошва мерзлой зоны является подвижной и не горизонтальной.

Интересны некоторые положения региональной гидродинамики глубоких горизонтов области многолетней мерзлоты, разрабатываемые рядом исследователей [2, 23, 32, 33 и др.]. В их работах можно найти ответы на ряд вопросов, связанных с движением подземных вод в артезианских бассейнах, установлением в них областей питания и очагов разгрузки подземных вод. Но они часто носят предположительный характер, и проблема региональной гидродинамической зональности, разгрузки подземных вод остается слабо изученной, дискуссионной и противоречивой.

По нашему мнению, путь выделения в разрезах бассейнов и других структур гидродинамических этажей менее научно обоснован, чем структур с тройной гидродинамической зональностью, прослеживаемой в структурах всех порядков и типов, в том числе и нефтегазоносных. В последнее время все больше и больше появляется данных о разгрузке глубоких подземных вод во многих бассейнах снизу вверх через слабопроницаемые и полупроницаемые водоупоры. В связи с этим необходимо более тщательно изучить фильтрационные свойства пород, слагающих мерзлый водоупор, так как многие артезианские бассейны Сибири не имеют хорошо картируемых и видимых очагов и областей разгрузки подземных вод.

Мерзлотно-гидрогеологические явления. В результате изучения мерзлотно-гидрогеологических явлений, связанных с образованием бугров пучения, гидролакколитов, наледей, развитием термокарста [4, 8, 11, 12, 14, 18, 20, 22, 25—28, 31, 34, 36 и др.], дано научное обоснование процессов их образования, разработана методика изучения. Основные положения, разработанные много лет тому назад А. В. Львовым, М. И. Сумгиным и Н. И. Толстихиным, не претерпели существенных изменений, они справедливы и в наши дни. Правда, в последние годы в изучении наледей развиваются как бы два направления, дополняющие одно другое: 1) естественно-инженерно-практическое, связанное с оценкой ресурсов подземных вод по динамике и режиму наледей во времени [31]; 2) естественно-географическое, связанное с выяснением условий формирования наледей, связи грунтовых наледей с речными, географии наледей [32].

Разведка и эксплуатация вод для водоснабжения. В многочисленных работах, посвященных разведке и эксплуатации подземных вод для водоснабжения в районах мерзлоты [3, 6, 11, 15, 19, 24, 27, 28], разработаны

вопросы технологии бурения в мощной и немощной, сплошной и прерывистой зонах мерзлоты. В меньшей степени исследованы методы гидродинамических расчетов при опробовании скважин и оценке эксплуатационных запасов подземных вод. Кроме целей водоснабжения, выполнены попутные и специальные гидрогеологические исследования при разведке и эксплуатации угольных, рудных, газовых и нефтяных месторождений, а также алмазов и россыпей золота и др. (Якутия, Норильск, Магаданская область, Чукотка), в результате которых удалось осветить мерзлотно-гидрогеологические условия многих месторождений полезных ископаемых, разработать методику опробования глубоких водоносных горизонтов на газоносных площадях, а также вопросы фильтрации при оттайке мерзлых пород на россыпных месторождениях.

Картирование и районирование. Районированием и картированием подземных вод области многолетней мерзлоты занимались и занимаются многие научно-исследовательские организации и геологические управления, а также все ученые и гидрогеологи-практики.

Все гидрогеологические съемки, проведенные в целях общего изучения гидрогеологии области мерзлоты, водоснабжения, нефтегазоносности и т. п., завершались построением гидрогеологических карт различного масштаба и назначения.

Научное геологическое и мерзлотно-гидрогеологическое обоснование гидрогеологических структур области мерзлоты (артезианских бассейнов, массивов, районов) дал в своих многочисленных работах Н. И. Толстихин, что и является основой обзорных гидрогеологических, гидрохимических карт и карт минеральных вод СССР, водоснабжения Якутии, составленных ВСЕГЕИ, ВСЕГИНГЕО, ИМ СО АН СССР, Институтом геологии Арктики, МГУ [21] и геологическими управлениями.

Заключение

Различные стороны существования подземных вод области мерзлоты изучены неравномерно. Более полно освещены вопросы региональной гидрогеологии, гидрогеологии отдельных районов области мерзлоты, химии вод и мерзлотно-гидрогеологических явлений, менее полно—динамика над-, меж- и подмерзлотных вод, гидродинамическая зональность, взаимодействие мерзлых пород с подземными водами, микрокомпонентный состав вод и др.

В связи с этим дальнейшему изучению подлежат: 1) подземные воды с отрицательной температурой, залегающие как в самой толще мерзлоты, так и у ее нижней границы; 2) фильтрационные свойства мерзлых горных пород в диапазоне отрицательных температур, соответствующих температурам этих пород в рассматриваемых районах; 3) динамика гравитационных над-, меж- и подмерзлотных вод в различных гидрогеологических структурах и районах и в связи с этим внедрение в практику гидрогеологических расчетов формул упруговодонапорного режима водоносных горизонтов; 4) региональная динамика глубоких водоносных горизонтов, гидродинамическая зональность бассейнов и районов с мощной зоной мерзлых пород, залегающих ниже общего базиса эрозии; 5) талики в ЗММГП, под руслами рек и озерами путем широкого применения геофизических методов исследований в целях выявления влияния таликов на динамику подземных вод, локальную и региональную гидродинамическую и гидрохимическую зональности подземных вод; 6) микрокомпонентный состав гравитационных подземных вод, рыхлосвязанных (пленочных) и низкотемпературных, содержащихся в самих мерзлых горных породах; 7) миграция связанной воды в ДС и ЗММГП и в связи с этим даль-

нейшая разработка гидрохимических поисков полезных ископаемых в районах с мощной мерзлотой; 8) макро- и микрокомпонентный составы подземных льдов в связи с практическим их использованием для водоснабжения, технических и поисковых целей; 9) динамика мерзлотного процесса, связанного с различными типами подземных вод области мерзлоты; 10) методика мерзлотно-гидрогеологических исследований в зимний период для районов с развитием наледей и выходов теплых и термальных подземных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимова Н. П. Химический состав воды в подозерных и подрусловых таликах района Лено-Амгинского междуречья Центральной Якутии. В сб. «Вопросы специальной гидрогеологии Сибири и Дальнего Востока». Иркутск, 1962.
2. Басков Е. А. Подземные минеральные воды и палеогидрогеология Восточно-Сибирской артезианской области. Автореф. док. дисс., ВСЕГЕИ, 1967.
3. Вельмина Н. А. Каптаж подземных вод в условиях вечной мерзлоты. АН СССР, 1952.
4. Вельмина Н. А., Узембло В. В. Гидрогеология центральной части Южной Якутии. АН СССР, 1959.
5. Гольдман В. Г., Знаменский В. В., Чистопольский С. Д. Гидравлическое оттаивание мерзлых горных пород. Магадан, 1970.
6. Губкин Н. В. Подземные воды бассейна верхнего течения р. Колымы. АН СССР, 1952.
7. Достовалов Б. Н., Кудрявцев В. А. Общее мерзлотоведение. МГУ, 1967.
8. Ефимов А. И. Мерзлотно-гидрогеологические особенности прибрежного и руслового участков р. Лены в районе г. Якутска. Наука, 1964.
9. Ефимов А. И. Подземные воды области многолетнемерзлых пород Восточной части Сибирской платформы. В сб. «Проблемы гидрогеологии». Госгеолтехиздат, 1960.
10. Ильина Е. В., Любомиров Б. Н., Тычино Н. Ф. Подземные воды и газы Сибирской платформы. Гостоптехиздат, 1962.
11. Калабин А. И. Вечная мерзлота и гидрогеология Северо-Востока СССР. Тр. ВНИИ-1, т. XVIII. Магадан, 1960.
12. Качурин С. П. Термокарст на территории СССР. АН СССР, 1961.
13. Кудрявцев В. А. Температура верхних горизонтов вечной мерзлой толщи в пределах СССР. АН СССР, 1954.
14. Косолапов А. И., Косолапова М. Н., Сороко Т. И. Геохимия природных вод, газов и нефтей Якутии. Мат. Всесоюзн. совещ. по оценке нефтегазоносности территории Якутии. Недра, 1968.
15. Львов А. В. Поиски и испытание источников водоснабжения на западной части Амурской ж. д. в условиях «вечной» мерзлоты. Иркутск, 1916.
16. Максимов В. М. О химизме подземных вод Якутского артезианского бассейна. Зап. ЛГИ, т. XXXIV, вып. 2, 1958.
17. Максимов В. М. Классификация подземных вод Якутского бассейна. Зап. ЛГИ, т. LXIV, вып. 2, 1962.
18. Мат. VIII Всесоюзного междуведомственного совещания по геокриологии и мерзлотоведению. Якутск, 1966.
19. Мельников П. И., Ефимов А. И. Опыт эксплуатации подземных вод в области распространения вечной мерзлоты в Центральной Якутии. АН СССР, 1953.
20. Мерзлотные исследования, вып. I—XI, МГУ, 1961—1971.
21. Методика комплексной мерзлотно-гидрогеологической и инженерно-геологической съемки. Изд. МГУ, 1970.
22. Некрасов И. А. К вопросу о классификации таликов. Изв. ВГО, № 2, 1963.
23. Пиннекер Е. В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. Наука, 1966.
24. Подземные воды Якутии как источник водоснабжения. Наука, 1967.
25. Попов А. И. Мерзлотные явления в земной коре (криолитология). МГУ, 1967.
26. Пономарев В. М. Подземные воды территории с мощной толщей многолетнемерзлых горных пород. АН СССР, 1960.
27. Сумгин М. И. и др. Общее мерзлотоведение. АН СССР, 1940.
28. Толстихин Н. И. Подземные воды мерзлой зоны литосферы. Госгеолиздат, 1941.
29. Толстихин Н. И., Вельмина Н. А., Ефимов А. И. Гидрогеология области многолетнемерзлых пород Советского Союза. Докл. международн. конф. по мерзлотоведению. АН СССР, 1963.

30. Толстихин Н. И. Классификация природных минеральных вод по температуре. Изв. ВУЗов. Геология и разведка, № 3, 1970.
31. Толстихин О. Н. О возможности использования площадей наледей для ориентировочной оценки ресурсов подземных вод. В сб. «Методика гидрогеологических исследований». Наука, 1966.
32. Фотиев С. М. Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна. Наука, 1965.
33. Фролов Н. М. Гидрогеотермия. Недра, 1968.
34. Цытович Н. А. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах. АН СССР, 1958.
35. Швецов П. Ф. Подземные воды территории с мощной толщей многолетнемерзлых горных пород. АН СССР, 1960.
36. Швецов П. Ф. Закономерности гидрогеотермических процессов на Крайнем Севере и северо-востоке СССР. Наука, 1968.