

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КРИОЛИТОЗОНЫ

УДК 551.340

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КРИОГЕННОЙ ОБЛАСТИ РОССИИ
(КЛАССИФИКАЦИЯ)

С.М. Фотиев

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; kriozem@gmail.com

За криогенный период (последние 3,1 млн лет) на огромной циркулярной площади России геотермические и гидрогеологические условия в недрах геологических структур существенно изменились. В недрах структур в результате многолетнего промерзания пород сформировались мощные низкотемпературные криогенные водоупоры. Они сильно изменили условия водообмена, гидрохимическую зональность и емкость гидрогеологических структур. На основе современных научных разработок в области гидрогеологии и геокриологии в статье показано огромное, но крайне неравномерное во времени и в пространстве влияние процесса криогенного метаморфизма пород на преобразование гидрогеологических условий в недрах гидрогеологических структур, расположенных в разных геокриологических зонах. При разработке классификации подземных вод криогенной области автор исходил из положения, что геологические структуры и скопления основных типов подземных вод в них сформировались до начала криогенного периода. На протяжении криогенного периода подземные воды оказывали активное тепловое сопротивление многолетнему промерзанию пород. Именно поэтому в основу классификации положена водопроницаемость пород – их важнейшая с гидрогеологических позиций характеристика.

Подземные воды, криогенная область, криометаморфический цикл, мощность и прерывистость криогенного водоупора, классификация

UNDERGROUND WATERS OF CRYOGENIC AREA OF RUSSIA
(CLASSIFICATION)

S.M. Fotiev

Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia; kriozem@gmail.com

During the cryogenic period (the last 3.1 million years) the geothermal and hydrogeological conditions inside the geological structures have essentially changed all over the vast circumpolar area of Russia. As a result of perennial freezing of rocks, thick low-temperature cryogenic aquicludes formed inside the structures. They had considerably changed the conditions of water-exchange, the hydrochemical zonality and the capacity of hydrogeological structures. Based on the contemporary scientific researches in the fields of hydrogeology and geocryology, the enormous but utterly irregular (in time and space) influence of the process of cryogenic metamorphism of rocks on the transformation of the hydrogeological conditions inside the hydrogeological structures situated in various geocryological zones has been revealed. Elaborating the classification of the underground waters of cryogenic area, the author proceeded from the assumption that the geological structures and the accumulation of the main types of the underground waters inside them had formed before the beginning of the cryogenic period. During the cryogenic period the underground waters had maintained the active thermal resistance to the perennial freezing of rocks. Therefore, the classification of the underground waters of the cryogenic area has been founded on the key hydrogeological feature of the rocks – their water-permeability.

Underground waters, cryogenic area, cryometamorphic cycle, thickness and discontinuity of the cryogenic aquiclude, classification

ВВЕДЕНИЕ

Изучением условий формирования подземных вод земной коры занимался большой коллектив российских и зарубежных гидрогеологов. Ими разработаны различные классификации, подробный обзор которых выполнен А.А. Маккаевым

[1961] и В.М. Максимовым [1987]. Классификации подземных вод построены по одному или нескольким показателям. Общие классификации разрабатывались по нескольким признакам: происхождение, условия залегания, режим движения,

гидравлические свойства, температура и др. Частные классификации разработаны по одному признаку, например: химический состав, минерализация, температура и т. д.

Основное внимание в статье уделено огромному, но крайне неравномерному во времени и пространстве влиянию процесса криогенного метаморфизма пород на преобразование гидрогеологических условий в недрах различных структур, расположенных в разных геокриологических зонах. Опираясь на многолетние научные разработки гидрогеологов и геокриологов и учитывая преимущества и недостатки многочисленных классификаций, автор предлагает новый вариант классификации подземных вод в гидрогеологических структурах, расположенных на территории криогенной области (КО)¹ России – области распространения криогенных толщ (КТ)² и криогенных водоупоров (КВ)³.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ В НЕДРАХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Основные типы подземных вод. Подземные воды в породах земной коры встречаются практически повсеместно. Их скопления отмечены в разных геолого-тектонических условиях и в различных климатических зонах. На условия формирования и распространение скоплений разных по генезису подземных вод оказывает влияние большое количество природных факторов, что в значительной степени усложняет создание единой классификации.

Одна из первых классификаций подземных вод была составлена С.Н. Никитиным и Н.Ф. Погребовым еще в 1895 г. В ней впервые выделено два основных типа подземных вод – грунтовые и артезианские. Позднее было предложено много классификаций подземных вод⁴. Однако в настоящее время эти классификации имеют только исторический интерес.

Ф.П. Саваренский [1939] по режиму подземных вод и условиям их формирования предложил выделять пять типов подземных вод: верховодка, грунтовые, карстовые, артезианские и жильные (трещинные) воды. Каждый тип охарактеризован по девяти показателям (табл. 1). Классификация Ф.П. Саваренского многие годы широко использовалась гидрогеологами как в практических целях при изучении подземных вод в различных регионах России, так и теоретически при составлении их классификаций. Особенности подземных

вод в гидрогеологических структурах КО в классификации Ф.П. Саваренского не учитывались, так как сведения о них были весьма ограниченными.

А.М. Овчинников в учебнике “Общая гидрогеология” [1955] предложил “Схему подразделения подземных вод по условиям залегания”. В ней выделено три типа: верховодка, грунтовые и артезианские воды, а в каждом типе по четыре подтипа: поровые, трещинные, воды районов “вечной мерзлоты” и воды молодого вулканизма. В.М. Максимов [1987] по происхождению делил подземные воды на пять видов: инфильтрационные, конденсационные, седиментационные, органического происхождения и ювенильные, а по условиям залегания и характеру вмещающих воду пород – на четыре вида: поровые, пластовые, трещинные и трещинно-жильные. Согласно классификации И.К. Зайцева [1974], подземные воды по характеру скопления, а следовательно, и по коллекторским свойствам пород делятся на пластовые (порово-пластовые, трещинно-пластовые и карстово-пластовые) и трещинно-жильные (регионально-трещинные и локально-трещинные). По типам скопления подземных вод и по проницаемости пород О.Н. Толстихин [1984б] выделяет: пластовые воды – с поровой, трещинной или карстовой проницаемостью; трещинные и пластово-трещинные, водопроницаемость которых предопределяется характером зоны региональной трещиноватости; карстовые – с пластовой или трещинной проницаемостью; жильные – с трещинной или карстовой проницаемостью. Из приведенных примеров видно, что гидрогеологическая терминология до настоящего времени еще окончательно не разработана, а принципы выделения и названия типов (видов) подземных вод у исследователей разные.

В основу классификации автора положена водопроницаемость пород – их основная с гидрогеологических позиций характеристика. Величина водопроницаемости пород, как известно, во многом зависит от размера пор, трещин и других пустот. Именно поэтому в зависимости от водопроницаемости пород, от их способности пропускать воду через поры, трещины и карстовые пустоты предлагается различать четыре типа подземных вод: поровые, трещинные, карстовые и разломные (жильные).

1-й тип. *Поровые воды* залегают в различных по гранулометрии, минералогическому составу и генезису, несцементированных или слабосцементированных породах. Водообмен осуществляется по порам пород. По условиям залегания, режиму и

¹ Криогенная область – область распространения криогенных пород с отрицательной температурой.

² Криогенная толща – толща пород с отрицательной температурой.

³ Криогенный водоупор – многолетнемерзлые породы, трещины и поры которых заполнены льдом.

⁴ В 1917 г. – Р.А. Дели, 1921 г. – Е.А. Мартель, 1923 г. – О.Е. Мейнцель, 1928 г. – А.М. Жирмудский, А.А. Козырев, 1928 г. – Б.Л. Личков, 1931 г. – О.К. Ланге, 1935 г. – Н.Н. Славянов [Маккаев, 1967].

Классификация подземных вод [Саваренский, 1939]

Таблица 1.

| Тип воды | Область питания и распространение | Характер напора | Характер движения потока | Происхождение | Геологические условия залегания | Климатическая зональность | Температура | Геохимическая зона | Химическая характеристика |
|---------------------------------|--|--|---|---------------------|--|---------------------------|--------------------------------|--|----------------------------------|
| Почвенные, болотные, верховодка | Совпадают (воды, близкие к поверхности) | Нисходящие, ненапорные | Ламинарный | Вадозные | Поверхностные образования | Интерзональные | Подвержена сезонным колебаниям | Зона выщелачивания и местами засоления | Пресные, местами засоленные |
| Грунтовые | Обычно совпадают (воды неглубокие) | Нисходящие, ненапорные, иногда с местным напором | Преимущественно ламинарный | » | Поверхностные отложения и верхние слои коры выветривания | Зональные | – | – | – |
| Карстовые | Близкие преимущественно неглубокие) | Обычно нисходящие, ненапорные | Преимущественно турбулентный | » | Известняки, доломиты и другие выщелачиваемые породы | Азональные | Обычно непостоянная | Зона выщелачивания | Пресные, обычно жесткие |
| Артезианские | Не совпадают (воды преимущественно глубокие) | Восходящие, напорные, напор гидростатический или газовый | Ламинарный в рыхлых породах и турбулентный в трещиноватых породах | » | Структуры осадочных пород (бассейны) | » | Повышающаяся с глубиной | Зона выщелачивания и цементации | Пресные, иногда минерализованные |
| Жильные (трещинные) | – | Восходящие, напор гидростатический или газовый | Преимущественно турбулентный | Вадозные ювенильные | Преимущественно зоны тектонической трещиноватости | » | То же | Зона цементации | Пресные и минерализованные |

гидравлическим свойствам выделено два вида – грунтовые и артезианские воды. *Грунтовые воды* залегают в первом от поверхности водоносном горизонте. Они имеют свободную поверхность, но иногда приобретают сезонный напор. *Артезианские воды* залегают на значительной глубине от поверхности в водоносных горизонтах, покрытых водоупорной кровлей, имеют напор.

2-й тип. *Трещинные воды* залегают и циркулируют по трещинам различного генезиса в магматических, метаморфических и сильнометаморфизованных осадочных породах. Водообмен осуществляется по системе сообщающихся трещин. По условиям залегания, режиму и гидравлическим свойствам выделено два вида – грунтовые и артезианские воды.

3-й тип. *Карстовые воды* залегают и циркулируют по карстовым полостям, каналам или пустотам в различных по составу и генезису растворимых породах (известняк, гипс и др.). Водообмен осуществляется по сети сообщающихся между собой карстовых пустот.

4-й тип. *Разломные (жильные) воды* локально залегают и циркулируют по трещинам вдоль молодых или омоложенных тектонических разломов. Водообмен осуществляется по открытым (иногда зияющим) трещинам.

Гидрогеологические структуры. Гидрогеологическое районирование – результат научного обобщения региональных сведений о подземных водах. Районирование отражает закономерности формирования и особенности распространения подземных вод в недрах геологических структур. В качестве основной единицы гидрогеологического районирования Г.Н. Каменский, М.М. Толстихина, Н.И. Толстихин [1959] приняли гидрогеологическую структуру, в которой подземные воды по условиям формирования связаны в единую систему и закономерно распределены. В качестве основных их типов выделены артезианские структуры и гидрогеологические массивы⁵.

Артезианские структуры приурочены к впадинам на платформах, межгорным впадинам и предгорным прогибам. Они обычно имеют двухъярусное строение. Верхний ярус (чехол структуры) сложен осадочными породами, водоносные горизонты которых чередуются с водоупорными пластами. Нижний ярус (фундамент структуры) сложен магматическими или метаморфическими породами. Напор подземных вод – характерная особенность артезианских структур. По составу водовмещающих пород и по типу скоплений подземных вод различают: артезианские и адартезианские бассейны. *Артезианские бассейны* (АБ) –

⁵ Ранее В.М. Пономарев [1959] выделил два типа гидрогеологических структур: артезианские бассейны и гидрогеологические складчатые области.

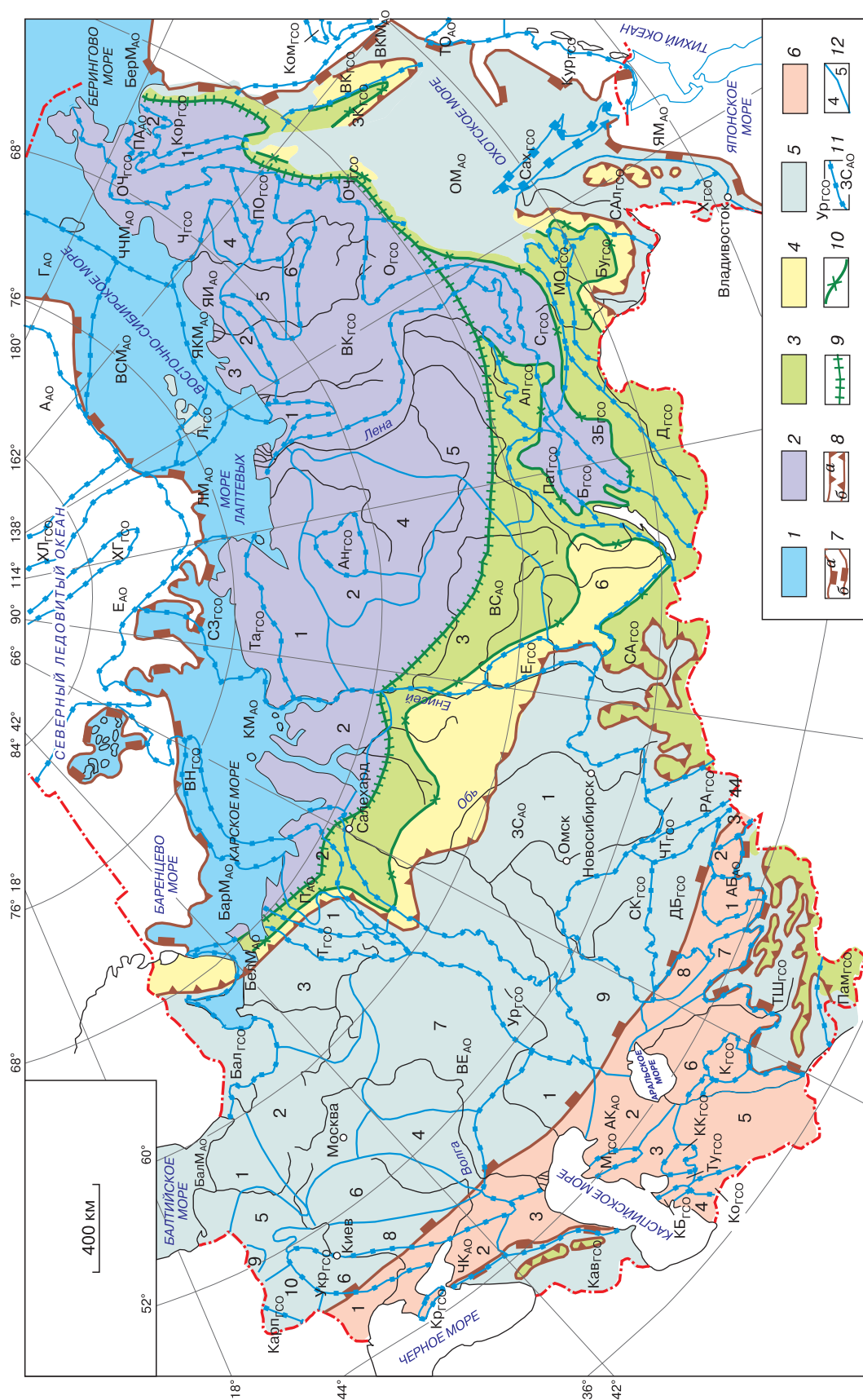


Рис. 1. Схема гидрогеоклиматического районирования территории России и сопредельных территорий.

1 – субмаринная криотенная область; 2–4 – субарктиальная криотенная область (Северная (2) и Южная (3, 4) геокриологические зоны); 5 – зона сплошного распространения криотенных водоупоров ($T_{п} = -2... -14^{\circ}\text{C}$, $M_{кв} = 100-600\text{ м}$, $F_{кв} = 95-100\%$); 6 – зона прерывистого распространения криотенных водоупоров ($T_{п} = -1... -3^{\circ}\text{C}$, $M_{кв} = 0-150\text{ м}$, $F_{кв} = 50-95\%$); 7 – зона острого распространения криотенных водоупоров ($T_{п} = 0... -1^{\circ}\text{C}$, $M_{кв} = 0-50\text{ м}$, $F_{кв} = 0-50\%$); 8 – зона полной деградации криотенных водоупоров, формировавшихся в экстремально холодные периоды плейстоцена (в том числе в сарматский криохрон); 9 – зона, где гидрогеологические условия в недрах структур не изменились под воздействием криогенной метаморфизации пород на протяжении плиоцен-голоценового криогенного периода; 10 – северная (а) и южная (б) границы криогенной области в экстремально холодные периоды плейстоцена; 11 – северная (а) и южная (б) границы криогенной области в настоящее время.

шее время; 9 – граница Северной и Южной геокриологических зон; 10 – граница зон прерывистого и островного распространения криогенных водоупоров; 11 – граница артезианских областей (АО) и гидрогеологических складчатых областей (ГСО); 12 – граница артезианских бассейнов (АБ) и их номера.

Гидрогеологическое районирование составлено на основе "Гидрогеологической карты СССР" [1966] и "Карты гидрогеологических структур СССР" [Зайцев, 1974].

Субэаральные артезианские области: Печорская (П_{АО}): 1 – Печорский АБ, 2 – Предуральский АБ, 2 – Воронешский, 7 – Волго-Камский, 8 – Приуральский, 9 – Брестский, 10 – Вольно-Подольский АБ; Северо-Каспийская (СК_{АО}): 1 – Северо-Каспийский АБ, 2 – Азово-Кубанский АБ, 3 – Терско-Каспийский АБ, 3 – Арало-Каспийский АБ, 3 – Каракуль-Сарысулский, 9 – Тургайский АБ, 2 – Усть-Юрский, 3 – Среднекаспийский, 4 – Южно-Каспийский, 5 – Амударьинский, 6 – Амударьинский, 7 – Чуйский, 8 – Каракуль-Сарысулский, 9 – Тургайский АБ; Алаколь-Балхашская (АБ_{АО}): 1 – Алакольский АБ, 2 – Лепинский АБ, 3 – Южно-Балхашский АБ; Западно-Сибирский АБ; 2 – Прикарский АБ; Восточно-Сибирская (ВС_{АО}): 1 – Хатанский АБ, 2 – Копуйский, 3 – Оленекский, 4 – Тунгусский, 5 – Якутский, 6 – Анаро-Ленский АБ; Яно-Индигирская (ЯИ_{АО}): 1 – Яно-Омолонский АБ, 2 – Ольджойский, 3 – Индигиро-Кольмский, 4 – Оинийский, 5 – Алзейский, 6 – Индигиро-Зырянский АБ; Пенжино-Анадырская (ПА_{АО}): 1 – Пенжинский АБ, 2 – Анадырский АБ. **Субмаринные артезианские области:** Евразийская (Е_{АО}), Амерзйская (А_{АО}), Балтийскоморская (БалМ_{АО}), Беломорская (БелМ_{АО}), Баренцевоморская (БарМ_{АО}), Карскоморская (КМ_{АО}), Лаптевоморская (ЛМ_{АО}), Восточно-Сибирскоморская (ВСМ_{АО}), Яно-Кольоморская (ЯКМ_{АО}), Чаудно-Чукотскоморская (ЧЧМ_{АО}), Гиперборейская (Г_{АО}), Беринговоморская (БерМ_{АО}), Восточно-Камчатскоморская (ВКМ_{АО}), Тихоокеанская (ТО_{АО}), Охотскоморская (ОМ_{АО}), Япономорская (ЯМ_{АО}). **Субаральные гидрогеологические складчатые области:** Балтийская (БалГ_{ТСО}), Тиманская (ТГ_{ТСО}), Уральская (УРГ_{ТСО}), Таймырская (ТГ_{ТСО}), Анабарская (АнГ_{ТСО}), Верхояно-Кольмская (ВКГ_{ТСО}), Прикормо-Омолонская (ПОГ_{ТСО}), Чукотская (ЧГ_{ТСО}), Охотская (ОГ_{ТСО}), Охотско-Чукотская (ОЧГ_{ТСО}), Корякская (КорГ_{ТСО}), Западно-Камчатская (ЗКГ_{ТСО}), Восточно-Камчатская (ВКГ_{ТСО}), Карпатская (КарГ_{ТСО}), Украинская (УкрГ_{ТСО}), Крымская (КрГ_{ТСО}), Кавказская (КавГ_{ТСО}), Мангышлакская (МГ_{ТСО}), Кубадаг-Балхашская (КБГ_{ТСО}), Туаркырская (ТурГ_{ТСО}), Кызылкумская (ККГ_{ТСО}), Копендагская (КопГ_{ТСО}), Северо-Казахстанская (СКГ_{ТСО}), Чингиз-Тарбагатайская (ЧТГ_{ТСО}), Джунгаро-Балхашская (ДБГ_{ТСО}), Тянь-Шаньская (ТШГ_{ТСО}), Памирская (ПамГ_{ТСО}), Рундо-Алтайская (РАГ_{ТСО}), Саяно-Алтайская (САГ_{ТСО}), Енисейская (ЕГ_{ТСО}), Патомская (ПатГ_{ТСО}), Байкальская (БГ_{ТСО}), Забайкальская (ЗБГ_{ТСО}), Становая (СГ_{ТСО}), Даурская (ДГ_{ТСО}), Монголо-Охотская (МОГ_{ТСО}), Буринская (БурГ_{ТСО}), Сихоте-Алинская (САЛГ_{ТСО}), Хангайская (ХГ_{ТСО}), Островные и субмаринные гидрогеологические складчатые области: Вайгач-Новоземельская (ВНГ_{ТСО}), Северо-Земельская (СЗГ_{ТСО}), Ляховская (ЛГ_{ТСО}), Хребта Ломоносова (ХЛГ_{ТСО}), Хребта Геккеля (ХГ_{ТСО}), Сахалинская (СахГ_{ТСО}), Курильская (КуГ_{ТСО}), Командорская (КомГ_{ТСО}).

Характеристики криогенного водоупора: $T_{\text{п}}$ – температура пород; $M_{\text{кв}}$ – мощность криогенного водоупора; $F_{\text{кв}}$ – площадь криогенного водоупора.

структуры, водоносные горизонты которых выполнены слабосцементированными или совсем несцементированными осадочными породами. В АБ преобладают скопления поровых артезианских вод. *Адартезианские бассейны* (аАБ) – структуры, выполненные сильнометаморфизованными осадочными породами⁶, в водоносных горизонтах которых преобладают скопления трещинных артезианских вод. В недрах АБ и аАБ локально существуют скопления разломных (жильных) вод.

Гидрогеологические массивы (ГМ) приурочены к выступам складчатого фундамента на платформах или к горным сооружениям в гидрогеологических складчатых областях и также имеют двухъярусное строение. В верхнем ярусе, совпадающем с мощностью зоны региональной трещиноватости (трещиноватой коры выветривания коренных пород), господствуют скопления трещинных грунтовых вод. В магматических или метаморфических породах нижнего яруса скопления трещинных и жильных вод существуют локально.

Гидрогеологические адмассивы (ГаМ) отличаются от ГМ не только составом слагающих их пород (они сложены сильнометаморфизованными осадочными и вулканогенными породами, сохранившими первоначальную слоистость), но и типом скопления подземных вод, – в них господствуют пластовые скопления трещинных вод и, локально, скопления разломных (жильных) вод.

Артезианские структуры или гидрогеологические массивы, объединенные сходностью геолого-тектонического развития, образуют артезианские и гидрогеологические складчатые области (АО и ГСО). При региональном гидрогеологическом районировании и картировании обособление (выделение) АБ и ГМ, а также АО и ГСО в настоящее время широко применяется гидрогеологами [Толстухин, 1962; Зайцев, Толстухин, 1963; Зайцев, 1974; Фотиев, 1978, 2009б; Толстухин, 1984б] (рис. 1).

КРИОМЕТАМОРФИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

К началу четвертичного периода на территории России и смежных территориях в пределах платформенных плит, в горных сооружениях и прилегающих акваториях уже сформировались субэаральные и субмаринные АБ и аАБ, а также ГМ и ГаМ. Пространственная неоднородность гидрогеологических условий в пределах 25 АО и 50

⁶ В сильнометаморфизованных осадочных породах, слагающих аАБ и ГаМ, движение подземных вод происходит в основном по трещинам разного генезиса, существование и обилие которых во многом определяется первоначальной слоистостью и литологическим составом пород [Зайцев, 1974].

ГСО⁷ (см. рис. 1) определялась сменой и различной продолжительностью континентального, морского, метаморфического и магматического генетических циклов формирования подземных вод в недрах структур. Эти циклы впервые выделены Г.Н. Каменским еще в 1947 г. В основу их выделения, как известно, положены тектонические циклы [Геологический словарь, 1978]. *Континентальный (инфильтрационный) цикл* охватывает время поднятия суши и регрессии моря. Он связан с процессами выветривания, формирующими в верхних горизонтах земной коры зону региональной трещиноватости пород, и с инфильтрацией атмосферных вод. На протяжении цикла в недрах структур были образованы скопления пресных, преимущественно гидрокарбонатно-кальциевых вод. *Морской (осадочный) цикл* охватывает время погружения суши и трансгрессии моря. Он включает осадконакопление в субмаринных условиях и формирование седиментационных вод. В течение цикла в недрах структур формировались скопления соленых, преимущественно хлоридных натриевых вод. *Метаморфический и магматический циклы* связаны с очагами интрузий и вулканов, с высокими температурами и давлением. Образование различных типов ювенильных вод на протяжении этого цикла обусловлено метаморфизмом горных пород и магматическими процессами.

В четвертичный период развитие гидрогеологических структур продолжалось, но протекало в иных геотемпературных условиях. Уже в конце плейстоцена на огромной циркумполярной площади Северного полушария Земли и до значительной глубины температура пород (T_p) опустилась ниже 0 °С, началось многолетнее промерзание пород верхних горизонтов земной коры. Под воздействием процесса криогенного метаморфизма, протекающего в породах при отрицательной температуре на протяжении десятков, сотен тысяч и даже миллионов лет, в недрах гидрогеологических структур произошло существенное и глубокое (1500 м и более) криогенное преобразование толщи пород и подземных вод. Мощные (до 600 м), сплошные по распространению КВ с температурой многолетнемерзлых пород (ММП) от –20 до –25 °С и ниже существенно изменили условия водообмена. Криогенные водоупоры, сформировавшиеся преимущественно в зоне свободного водообмена с пресными водами, изменили условия питания, движения и разгрузки подземных вод, а также гидрохимическую зональность и емкость гидрогеологических структур.

Таким образом, криогенный метаморфизм толщ пород и подземных вод – ведущий процесс, под воздействием которого на протяжении позднего плейстоцена, плейстоцена и голоцена коренным образом изменялись условия формирования и распространение подземных вод практически во всех гидрогеологических структурах России (см. рис. 1). Учитывая огромные масштабы криогенного преобразования условий формирования и распространения подземных вод в недрах гидрогеологических структур, автор вслед за Г.Н. Каменским предложил выделить период криогенного преобразования пород и подземных вод в недрах геологических структур в особый *криометаморфический цикл формирования подземных вод* [Фотиев, 2002]. Обосновать необходимость выделения криометаморфического цикла в 1947 г. Г.Н. Каменский не мог, так как в то время сведения о подземных водах в недрах гидрогеологических структур КО были весьма ограниченны. Только в настоящее время, опираясь на современные научные достижения в области геокриологии и гидрогеологии, можно в полной мере оценить огромное влияние процесса криогенного метаморфизма пород на условия формирования и распространения подземных вод в недрах структур КО России на всем протяжении криометаморфического цикла. По времени он совпадает с плейстоцен-голоценовым криогенным периодом. Начало криометаморфического цикла соотносится с началом устойчивого похолодания климата и в акватории Тихого океана [Shackleton et al., 1990].

Продолжительность криометаморфического цикла формирования подземных вод. Начало криометаморфического цикла формирования подземных вод в недрах структур было определено ранее [Фотиев, 2005] на основе геокриологической интерпретации уникальной, непрерывной на протяжении последних 5 млн лет Байкальской климатической летописи⁸. По содержанию в донных осадках диатомовых водорослей (ДВ) и биогенного кремнезема ($\text{SiO}_{2\text{биог}}$) на байкальских записях четко обособились теплые и холодные климатические эпохи, непрерывно сменяющие друг друга. Диатомовая запись [Карabanов и др., 2000] и запись биогенного кремнезема [Prokopenko et al., 2001] показали непрерывное ритмичное изменение содержания ДВ и $\text{SiO}_{2\text{биог}}$, которое резко увеличивалось в теплые климатические эпохи (ДВ до 84 %, $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ до 46 %) и также резко уменьшалось (ДВ до 0–20 %, а $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ до 2–3 %) в холодные. Автор сравнил значения ДВ и $\text{SiO}_{2\text{биог}}$, характер-

⁷ На «Карте гидрогеологических структур СССР» [Зайцев, 1974] в пределах АО и ГСО выделено 98 АБ первого порядка и 234 ГМ первого порядка.

⁸ Непрерывная Байкальская климатическая летопись последних 5 млн лет составлена большим коллективом ученых, тщательно и всесторонне изучавших донные осадки оз. Байкал [Безрукова и др., 1999; Карabanов и др., 2000, 2001; Вильямс и др., 2001; Кузьмин и др., 2001; Хурсевич и др., 2001; Prokopenko et al., 2001]. Более подробно результаты геокриологической интерпретации Байкальской климатической летописи изложены ранее в [Фотиев, 2005, 2009a].

ные для экстремально холодных и теплых эпох, с климатическими и геокриологическими условиями сартанского криохрона и голоценового термохрона. Они достаточно хорошо изучены. В результате сравнения было принято, что многолетнее промерзание пород и формирование толщ мерзлых пород (криогенных водоупоров), видимо, начиналось и происходило в климатические эпохи, когда содержание ДВ в донных осадках не превышало 20 %, а содержание $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ – 7 % [Фотиев, 2005, 2009б].

На основе геокриологической интерпретации записей ДВ и $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ автору впервые удалось: 1) сформулировать современные представления об эволюции геокриологической обстановки за последние 5 млн лет; 2) выявить непрерывную последовательность существенного изменения $T_{\text{п}}$, мощности и прерывистости КВ [Фотиев, 2005, 2009б].

В плиоцен-голоценовом криогенном периоде⁹ протяженностью 3,1 млн лет автор выделил три геокриологические эпохи. Они разделены продолжительными (250 и 550 тыс. лет) теплыми климатическими эпохами. В течение теплых эпох в южных районах КО¹⁰ криогенные водоупоры деградировали полностью или почти полностью, а в северных субарктических районах $T_{\text{п}}$ повышалась, но в пределах отрицательных значений¹¹. По содержанию ДВ и $\text{SiO}_{2\text{биог}}$ в донных осадках в каждой криогенной эпохе выделены термохроны и криохроны. *Термохроны* – теплые климатические хроны, обеспечивающие повышение $T_{\text{п}}$ и деградацию КТ (КВ). *Криохроны* – холодные климатические хроны, обеспечивающие понижение $T_{\text{п}}$, увеличение мощности КТ (КВ) и сокращение прерывистости КВ. Особенно наглядно плиоцен-голоценовый криогенный период, криогенные эпохи, а также термохроны и криохроны выделяются на двух составленных автором геокриологических летописях: упрощенной для позднего кайнозоя (3,1–0 млн лет) и более детальной для неоплейстоцена (эпохи Брюнес) (800–0 тыс. лет) [Фотиев, 2009а, 2011].

Временная и пространственная неоднородность криогенного преобразования в недрах структур толщ пород и подземных вод. На протяжении криогенного периода условия развития криогенного метаморфизма подчинялись всеобщим законам широтной зональности и высотной поясности. В связи с этим на равнинах в южных районах КО всегда было теплее, чем на равнинах в

северных районах или в горах на юге. Именно поэтому на территории КО в каждом криохроне и термохроне плиоцена, плейстоцена и голоцена всегда обособлялись две геокриологические зоны – Северная и Южная [Фотиев, 1978]. Широтное положение границы между зонами и положение южной границы КО изменялись. В криохроны эти границы смещались к югу, а в термохроны – к северу. Граница между Северной и Южной зонами достаточно четко обособляется и на площади современной КО (см. рис. 1). Она проведена по линии смыкания КТ плейстоценового и голоценового возраста [Фотиев, 1978, 2009б]. Зоны существенно различаются по температуре пород, а также по мощности и прерывистости КВ. В Северной геокриологической зоне развиты однослойные, низкотемпературные ($T_{\text{п}}$ от $-2...-3$ до $-9...-14$ °С и ниже), сплошные по распространению КВ преимущественно плейстоценового возраста¹². В Южной геокриологической зоне обособились две подзоны. В северной подзоне развиты двухслойные КВ плейстоценового и голоценового возраста, разделенные ярусом водоносных пород с положительной температурой, а в южной – однослойные КВ голоценового возраста. Высокотемпературные ($T_{\text{п}}$ от $-3...-2$ до 0 °С) КВ голоценового возраста имеют прерывистое и островное распространение.

На байкальской записи биогенного кремнезема [Prokopenko et al., 2001] за последние 800 тыс. лет наряду с мягкими и средними четко обозначены шесть экстремально холодных криохронов и шесть экстремально теплых термохронов [Фотиев, 2009а].

В экстремально холодные и продолжительные (40–60 тыс. лет) криохроны температура КВ опускалась ниже современной на 10–15 °С. Мощность КВ ($M_{\text{КВ}}$) увеличивалась, а прерывистость сокращалась. Площадь распространения КВ расширялась за счет продвижения южной границы КО к югу, а северной – к северу – на шельф, осушенный во время регрессии моря. В эти криохроны влияние процесса криогенного метаморфизма на гидрогеологические условия в недрах структур было максимальным.

В экстремально теплые термохроны, продолжительность которых уменьшалась от 50 тыс. лет (в раннем неоплейстоцене) до 6–8 тыс. лет (в голоцене), температура воздуха по сравнению с предыдущим криохроном быстро повышалась на 10–15 °С и была выше современной на 2–4 °С. В теп-

⁹ В настоящее время установлено, что за последние 2,5 млрд лет Земля пережила четыре ледниково-криогенных эры: две в протерозое, одну в палеозое и одну в кайнозое [Ершов и др., 2001].

¹⁰ Широтная зональность условий теплообмена в системе атмосфера–почва–литосфера, видимо, были такими же, как и в настоящее время.

¹¹ Деградация КТ сверху происходила только в субмаринных условиях в эпохи продолжительных трансгрессий Полярного моря.

¹² Южная граница Северной зоны совпадает с южной границей зоны сплошного распространения КВ.

лых климатических условиях в южных районах КО мерзлые породы КВ протаивали полностью, в центральных – частично, а в северных районах мерзлые породы КВ с поверхности не протаивали, хотя $T_{\text{п}}$ именно в верхних горизонтах КВ повышалась и весьма значительно. Протаивание мерзлых пород КВ снизу осуществлялось за счет теплового потока из недр земли, величина которого изменялась от 13 до 80 Вт/м² [Балобаев, 1991]. Мощность мерзлых пород, протаявших снизу, была значительно меньше по сравнению с глубиной протаивания мерзлых пород с поверхности, особенно в южных районах КО. В эти термохроны, особенно в южных районах КО, влияние КВ на особенности водообмена было минимальным, а в самых южных районах КО иногда сводилось к нулю.

Многочисленное промерзание и протаивание мерзлых пород КВ обуславливало формирование в недрах структур вблизи подошвы КВ зоны криогенной трещиноватости пород (ЗКТП). Ее характерная особенность – высокая криогенная трещиноватость и повышенная обводненность пород [Губкин, 1952; Калабин, 1960; Толстихин, Толстихин, 1973а,б; Суходольский, 1982; Толстихин, 1984а; Елисафенко, 1985; Фотиев, Елисафенко, 1989]. Трещины образовались в результате многократного промерзания пород в криохроны, когда мощность КВ увеличивалась, и последующего протаивания мерзлых пород снизу за счет теплового потока из недр земли в термохроны, когда мощность КВ уменьшалась. Зона криогенной трещиноватости пород сформировалась как в днищах речных долин, так и в недрах структур вблизи подошвы КВ. В южных районах КО, где мощность КВ на протяжении криогенного периода изменялась существенно и многократно, мощность ЗКТП ($M_{\text{ЗКТП}}$) достигает 100 и даже 300 м [Елисафенко, 1985]. В северных районах мощность ЗКТП значительно меньше (до 25 м). Здесь она формировалась преимущественно в днищах речных долин¹³.

Криогидрохимическая зональность в недрах гидрогеологических структур. В течение длительного континентального цикла (до начала плейстоцена) подземные воды в недрах структур формировались в условиях обильной инфильтрации атмосферных осадков и речных вод. В связи с этим в недрах структур в зоне активного водообмена сформировалась мощная (до 300 м, иногда более) зона пресных вод гидрокарбонатно-кальциевого состава. Ниже располагались зоны солоноватых и соленых вод

преимущественно хлоридного натриевого состава. Криогенное преобразование уже сформировавшихся гидрогеологических условий в недрах структур относится к началу плейстоценового периода (3,1 млн лет назад). Многолетнее промерзание пород привело к формированию в верхней части гидрогеологических структур КВ, представленного многолетнемерзлыми породами, трещины и поры которых заполнены пресным льдом. Наличие КВ – характерная особенность всех типов гидрогеологических структур КО, что позволяет называть их *гидрогеокриологическими структурами*.

В результате формирования КВ в недрах гидрогеологических структур существенно изменилась гидрохимическая зональность подземных вод. Глубина криогенного преобразования гидрохимической зональности оказалась различной в разных геокриологических зонах. Ее величина определялась мощностью КВ, поэтому в южных районах КО она измерялась метрами, а в северных – сотнями метров. Мощность КВ не только изменила гидрохимическую зональность, но и определила возможность существования в недрах структур скоплений пресных вод, пригодных для водоснабжения. При поиске скоплений пресных вод гидрогеологи давно обратили внимание на эту зависимость. Они предложили сравнивать мощность КВ (“многолетней мерзлоты” по И.К. Зайцеву, или “мерзлой зоны” по Н.И. Толстихину) в артезианских структурах с мощностью зоны пресных вод, а в ГМ – с мощностью зоны региональной трещиноватости пород, содержащей, как известно, наиболее обильные скопления пресных вод. Как видим, критерии оценки в разных типах гидрогеологических структур различны. В АБ скопления подземных вод различаются по химическому составу, а в ГМ – по степени трещиноватости пород [Толстихин, Толстихин, 1973а; Зайцев, 1974; Фотиев, 1974, 1978, 2009б; Толстихин, 1984а].

На платформах в крупных АБ и аАБ и в горных районах в небольших АБ и аАБ скопления пресных вод сохранялись только при условии, если мощность КВ была меньше мощности зоны пресных вод (ЗПВ), т. е. $M_{\text{КВ}} < M_{\text{ЗПВ}}$ (рис. 2, I–III)¹⁴. Обильные скопления пресных вод сохранялись также вблизи подошвы КВ, где они приурочены к ЗКТП (см. рис. 2, IV). Если мощность КВ больше мощности зоны пресных вод ($M_{\text{КВ}} > M_{\text{ЗПВ}}$), то скопления пресных вод полностью заморожены (см. рис. 2, V–VII). В этих

¹³ Водоносная ЗКТП сохранилась и в недрах структур, расположенных южнее современной границы КО, например, артезианские бассейны Восточно-Европейской АО (см. рис. 1). Породы в недрах этих АБ неоднократно промерзали и протаивали на протяжении плейстоцена и плейстоцена. Однако до сих пор на криогенное происхождение зон с повышенной криогенной трещиноватостью и обводненностью пород за пределами современной КО гидрогеологи не обращают внимания [Фотиев, 1978].

¹⁴ Во всех гидрогеокриологических структурах, где мощность зоны пресных вод больше мощности КВ, его подошва совпадает с подошвой КТ, а ниже подошвы КВ залегают скопления пресных вод.

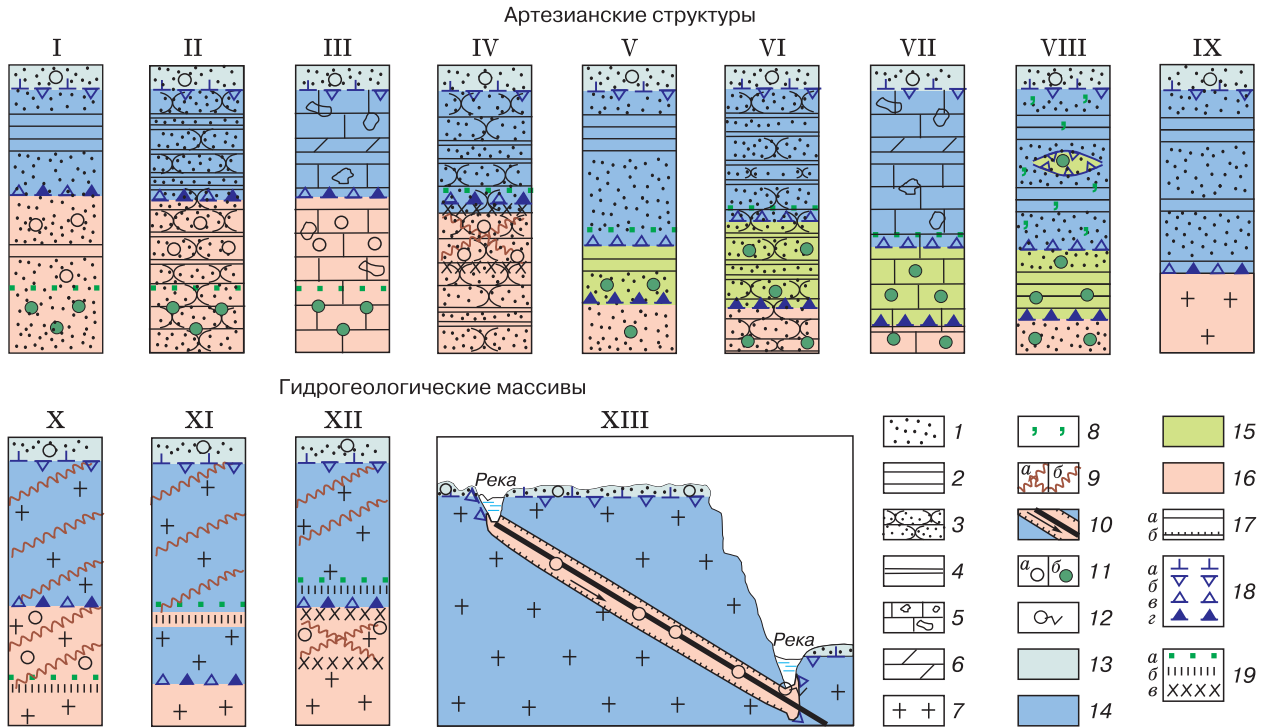


Рис. 2. Криогидрохимическое строение недр артезианских структур и гидрогеологических массивов.

I–IX – **артезианские структуры**: I–IV – скопления пресных вод ниже криогенного водоупора: I – порово-пластовые (АБ), II – трещинно-пластовые (аАБ), III – карстово-пластовые (АБ, аАБ), IV – криогенно-трещинные – только в зоне криогенной трещиноватости пород (аАБ, реже в других структурах); V–VII – скопления соленых вод ниже криогенного водоупора (породы с пресными водами заморожены): V – порово-пластовые (АБ), VI – трещинно-пластовые (линзы) (АБ, аАБ), VII – трещинные (АБ, аАБ); VIII – скопления соленых вод внутри и ниже криогенного водоупора (поровые и порово-пластовые в засоленных породах) (АБ на арктическом побережье); IX – скопления подземных вод в недрах структуры нет (водоносные породы чехла заморожены) (межгорные АБ).

X–XIII – **гидрогеологические массивы**: X – скопления пресных вод ниже криогенного водоупора (трещинные) (ГМ, ГаМ); XI – скопления подземных вод нет (породы с пресными водами заморожены); XII – криогенно-трещинные (только в зоне криогенной трещиноватости пород ГМ, ГаМ); XIII – жильные (в пронизывающем талике) (ГМ, ГаМ).

1 – песок; 2 – глина; 3 – трещиноватый песчаник; 4 – аргиллит; 5 – закарстованный известняк; 6 – мергель; 7 – магматические и метаморфические породы; 8 – засоленные породы; 9 – зоны криогенной (а) и региональной (б) трещиноватости пород; 10 – пронизывающий талик вблизи водоносного тектонического разлома; 11 – скопления подземных вод (а – пресные, гидрокарбонатно-кальциевые; б – соленые, хлоридные натриевые); 12 – источник подземных вод; 13 – породы сезонноталого слоя; 14, 15 – породы с отрицательной температурой (14 – ярус многолетнемерзлых пород (криогенный водоупор); 15 – ярус охлажденных пород с криопэгами); 16 – породы с положительной температурой; 17 – границы литологическая (а) и пронизывающего талика (б); 18 – подошва сезонноталого (сезонномерзлого) слоя (а), кровля (б) и подошва (в) криогенного водоупора, подошва криогенной толщи (з); 19 – границы зон пресных вод (а), региональной (б) и криогенной (в) трещиноватости пород.

структурах ниже КВ залегают скопления соленых вод с отрицательной температурой (криопэги)¹⁵. В недрах АБ, расположенных на арктических равнинах, пресные воды отсутствуют по иной причине. Арктические равнины в четвертичное время и ранее неоднократно и на продолжительное время затоплялись Полярным морем. На дне моря накапливались засоленные морские песчаные и глинистые отложения, содержащие скопления седиментационных соленых вод. Во время регрессий в

суровых климатических условиях плиоцена и плейстоцена морские отложения быстро промерзали, и морской цикл формирования подземных вод, минуя инфильтрационный, сменялся криометаморфическим. В субаральных условиях формировались КВ, сложенные мерзлыми засоленными породами. Именно поэтому в недрах АБ на арктических равнинах ниже КВ существуют только скопления соленых вод (см. рис. 2, VIII) [Фотиев, 1978, 2012].

¹⁵ В таких структурах КТ представлена ярусом мерзлых пород (КВ) и ярусом охлажденных пород с криопэгами.

В небольших межгорных АБ или аАБ мощность КВ нередко превышает мощность осадочных пород чехла. В таких бассейнах подземных вод нет, так как водоносные породы полностью промерзены. Однако скопления пресных вод могут быть приурочены к ЗКТП. При значительной мощности ЗКТП и ее региональной выдержанности целесообразно выделять эти зоны в самостоятельные криогенные бассейны подземных вод¹⁶, а приуроченные к ним скопления трещинных вод следует относить к особому виду – криогенному, подчеркивая тем самым криогенное происхождение трещин. Воды в таких бассейнах – напорные.

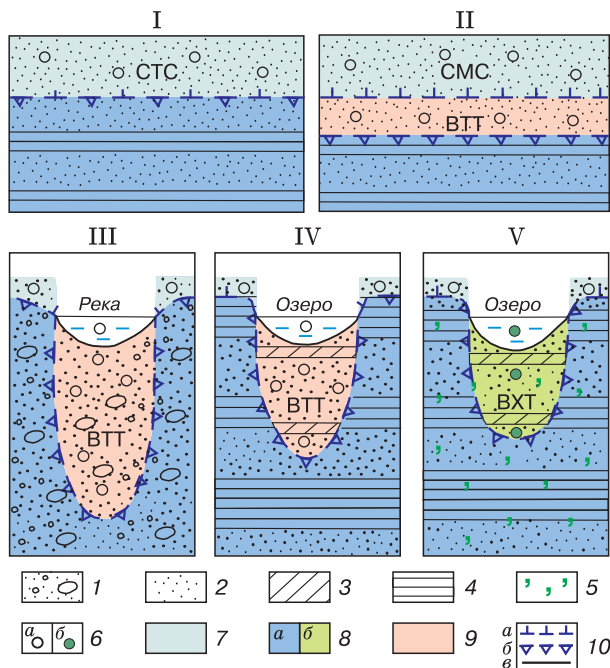


Рис. 3. Бассейны грунтовых вод криогенной области в породах сезонноталого слоя (СТС), в границах водно-тепловых таликов (ВТТ) и водно-химических таликов (ВХТ).

I – СТС на всех элементах рельефа; II – водопроводящие талики на междуречьях; III – водопроводящие талики в аллювии речных долин; IV – водовмещающие талики под пресными озерами на междуречьях и в долинах рек; V – водовмещающие талики в засоленных отложениях под солеными озерами на лайдах морских побережий. 1 – песчано-гравийно-галечниковые отложения; 2 – песок; 3 – суглинок; 4 – глина; 5 – засоленные породы; 6 – грунтовые воды (а – пресные, гидрокарбонатно-кальциевые; б – соленые, хлоридные натриевые); 7 – породы сезонноталого (сезонно-мерзлого) слоя; 8 – породы с отрицательной температурой (а – многолетнемерзлые породы (криогенный водоупор); б – соленые породы с криопэгмами); 9 – породы с положительной температурой; 10а – подошва сезонноталого (сезонно-мерзлого) слоя; 10б – кровля криогенного водоупора; 10в – литологическая граница.

Такие структуры следует называть *криогидрогеологическими* (см. рис. 2, IX).

В ГМ и ГаМ, где мощность КВ меньше мощности зоны региональной трещиноватости пород (ЗРТП) с пресными водами ($M_{КВ} < M_{ЗРТП}$), ниже КВ существуют скопления пресных трещинных вод (см. рис. 2, X). В ГМ и ГаМ, где мощность КВ больше мощности зоны региональной трещиноватости пород ($M_{КВ} > M_{ЗРТП}$), скопления пресных трещинных вод редкость (см. рис. 2, XI). Они приурочены только к локальным тектоническим разломам или к ЗКТП (см. рис. 2, XII). Типичные скопления разломных (жильных) вод представлены на рис. 2, XIII. Они имеют области питания, транзита и разгрузки, так как приурочены к тектоническим разломам, пронизывающим массив мерзлых пород. Транзит воды от области питания к области разгрузки происходит в границах первичных пронизывающих таликов. Однако значительно чаще разломные (жильные) воды служат связующим (транзитным) звеном между областями питания и разгрузки, расположенными на поверхности земли, и скоплениями поровых и трещинных вод в недрах структур.

Бассейны грунтовых вод до начала периода многолетнего промерзания пород были распространены практически повсеместно в самых верхних водоносных горизонтах земной коры. Достаточно высокие коэффициенты фильтрации пород – это основной критерий их существования. Водоносные горизонты разделялись литологическими водоупорами, породы которых отличались низкими или весьма низкими коэффициентами фильтрации. В результате многолетнего промерзания пород и формирования КВ размеры бассейнов грунтовых вод существенно сократились. Они ограничивались мощностью пород СТС или размерами таликов гидрогенного класса, существование которых определялось либо тепляющим воздействием природных вод, либо высокой минерализацией воды и засоленностью водовмещающих пород. Скопления грунтовых вод сосредоточились: 1) в породах СТС, ежегодно протаивающих летом за счет тепляющего воздействия солнечной радиации и атмосферных вод, но полностью или почти полностью промерзающих зимой; 2) в аллювиальных отложениях речных долин в пределах подрусловых водопроводящих таликов, существующих за счет тепляющего воздействия речных вод; 3) в озерных и таберальных отложениях в пределах подозерных водовмещающих таликов, существующих за счет тепляющего воздействия озерных вод; 4) в озерных отложениях в пределах подозерных водовмещающих водно-химических таликов, существующих благодаря высокой минерализации воды морского генезиса (рис. 3, I–V).

¹⁶ О.Н. Толстихиным [1984а] такие бассейны рекомендовано называть криогенными напорными. Однако этот термин не совсем удачный, так как напорными могут быть только воды, а бассейны напорными быть не могут.

Закономерности формирования, возможность существования, а также условия питания, транзита и разгрузки грунтовых вод более или менее подробно рассматривались всеми гидрогеологами, в том числе и автором [Фотиев, 1978, 2009б]. Они специфичны для каждой категории грунтовых вод и заслуживают специальной классификации, которая была разработана В.В. Шепелевым [2011].

Субаэральные области питания и разгрузки подземных вод. Особенности водообмена, свойственные гидрогеологическим структурам на территории КО, неоднократно рассматривались в многочисленных статьях и монографиях российских гидрогеологов-мерзлотоведов¹⁷. Детально они были описаны в работах [Фотиев, 1965, 1978, 2009б], поэтому здесь приведем лишь главные.

1. На всей территории КО многолетнемерзлые породы, трещины и поры которых заполнены льдом, представляют собой КВ. В гидромеханическом смысле КВ сравнительно однородны независимо от литологического и петрографического разнообразия слагающих их пород.

2. Водообмен атмосферных, поверхностных и подземных вод на территории КО непосредственно связан с теплообменом. Существование водообменных систем даже в хорошо проницаемых (песчаных, галечниковых или сильнотрещиноватых) породах во многом зависит от $T_{\text{п}}$ и мощности КВ.

3. Взаимосвязь атмосферных, поверхностных и подземных вод происходит на всей территории КО. Она осуществляется только по таликам гидрогенного класса, определяющим прерывистость КВ.

4. Гидрогеокриологические границы между немерзлыми водоносными и мерзлыми водоупорными породами подвижны в течение годовых и более продолжительных периодов, что, естественно, отражается на условиях водообмена.

Перечисленные особенности водообмена в той или иной степени проявляются в различных структурах на территории Северной и Южной геокриологических зон. Даже в однотипных структурах, расположенных в разных геокриологических зонах, особенности криогенного преобразования условий водообмена различны, так как различны условия формирования сквозных гидрогенных таликов, по которым происходит взаи-

модействие атмосферных, поверхностных и подземных вод.

Учитывая огромное значение атмосферных, поверхностных (речных, озерных и морских) и подземных вод в формировании геотермических аномалий, автором [Фотиев, 1978] была разработана специальная классификация¹⁸ таликов гидрогенного класса, в основу которой было положено тепловое взаимодействие природных вод и мерзлых пород. По характеру теплового взаимодействия подземных вод и мерзлых пород в ней выделены *водно-тепловые талики*, в которых породы и подземные воды имеют положительную температуру, и *водно-химические талики*, в которых породы и подземные воды имеют отрицательную температуру. По направлению и характеру движения (нисходящему, восходящему, наклонному, застойному) выделены *водопоглощающие талики*, к которым приурочены области питания подземных вод, *водовыводящие талики*, к которым приурочены области разгрузки подземных вод, *водопроводящие талики*, к которым приурочены области транзита подземных вод, и *водовмещающие талики* – вместилища грунтовых вод. По скорости движения и удельной производительности потока природных вод в породах (фильтрация или флюация)¹⁹ талики получили конкретные названия: в области питания – *инфильтрационные* или *инфлюационные талики*, в области транзита – *фильтрационные* или *флюационные талики*, в областях разгрузки напорных подземных вод – *напорно-фильтрационные* или *напорно-флюационные талики*, а в областях разгрузки ненапорных подземных вод – *ненапорно-фильтрационные* или *ненапорно-флюационные талики*²⁰. Таким образом, с одной стороны, природные воды определяют возможность существования таликов, т. е. прерывистость КВ, а с другой – степень прерывистости КВ определяет особенности водообмена, т. е. возможность существования областей питания, транзита и разгрузки подземных вод в разных геокриологических зонах. Эта взаимозависимость характерна только для структур КО, так как вне КО водообмен поверхностных и подземных вод не зависит от геотермических условий. Зависимость областей питания, транзита и разгрузки подземных вод в структурах КО от $T_{\text{п}}$ и мощности КВ определяет их дифференциацию по разным гео-

¹⁷ В 1916 г. – А.В. Львов, 1940 г. – И.Я. Баранов, 1941 г. – Н.И. Толстихин, 1951 г. – П.Ф. Швецов, 1952 г. – Н.В. Губкин, 1953 г. – А.В. Барьгин, 1959 г. – Н.И. Обидин, 1960 г. – А.И. Ефимов, 1960 г. – В.М. Пономарев, 1960 г. – А.И. Калябин, 1962 г. – О.В. Равдоникас, 1965, 1978, 2009 гг. – С.М. Фотиев, 1969 г. – Е.В. Пиннекер, 1970 г. – Н.А. Вельмина, 1982 г. – С.Е. Суходольский, 1983 г. – Н.Н. Романовский, 2006 г. – С.В. Алексеев, 2011 г. – В.В. Шепелев.

¹⁸ Генетическая классификация таликов, в которой впервые гидрогенные талики выделены в качестве самостоятельного класса, была разработана автором ранее [Фотиев, 1968].

¹⁹ *Фильтрация* – медленное (обычно менее 50 м/сут) движение воды по мелким порам и тонким трещинам. *Флюация* – активное движение воды по крупным зияющим трещинам и карстовым полостям.

²⁰ Более подробно роль гидрогенных таликов в водообмене и формировании прерывистости КТ рассмотрена в работах [Фотиев, 1978, 2009б].

криологическим зонам и акцентирует внимание на необходимости учета теплосодержания потока подземных вод. В этом и заключается основное отличие условий водообмена в гидрогеологических структурах КО от аналогичных структур вне КО.

Области питания, транзита и разгрузки подземных вод в субаэральных гидрогеологических структурах КО (см. рис. 1) приурочены к водно-тепловым таликам²¹. Их тепловая устойчивость в любой геокриологической зоне определяется, с одной стороны, удельной производительностью нисходящего или восходящего потока подземных вод и их теплосодержанием, а с другой – температурой пород и мощностью КВ.

Флюационные области питания и разгрузки артезианских²², трещинных, карстовых и жильных вод характеризуются значительным (более 50–80 м/сут) коэффициентом фильтрации пород и большим удельным объемом нисходящего или восходящего потока подземных вод на ограниченной площади. Они обладают значительной тепловой устойчивостью и вследствие этого существуют в зонах сплошного, прерывистого и островного распространения КВ. Хотя площади флюационных областей питания и разгрузки невелики, они играют важную роль в водообмене атмосферных, поверхностных и подземных вод во всех геокриологических зонах. Следует особо отметить большое значение линейных омоложенных тектонических разломов и приуроченных к ним скоплений разломных (жильных) вод для водообмена гидрогеологических структур КО. Установлено, что наиболее обильное пополнение ресурсов поровых, трещинных и карстовых скоплений подземных вод, залегающих ниже КВ, происходит в результате поглощения больших объемов речной воды омоложенными тектоническими разломами, пересекающими долины рек. К тектоническим разломам в долинах рек приурочены и наиболее крупные очаги разгрузки подземных вод. Поэтому так велика роль флюационных областей питания и областей разгрузки подземных вод в зоне сплошного распространения КВ. Здесь они размещаются только в днищах речных долин и вблизи тектонических разломов. “Питаются” подземные воды только речными водами в теплый период года.

Фильтрационные области питания и разгрузки поровых и трещинных вод характеризуются низким коэффициентом фильтрации, малым удельным объемом нисходящего или восходящего

потока, но более-менее равномерной фильтрацией на значительной площади. Они слабоустойчивы в тепловом отношении и вследствие этого существуют только в зонах прерывистого и островного распространения КВ, где занимают большие площади на междуречьях. В структурах, расположенных в зоне сплошного распространения КВ, фильтрационные области питания и разгрузки подземных вод отсутствуют, так как слабопроницаемые водопоглощающие и водовыводящие породы проморожены.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В НЕДРАХ СТРУКТУР КРИОГЕННОЙ ОБЛАСТИ

Первая классификация, учитывающая особенности формирования и распространения подземных вод в пределах КО (“области распространения мерзлой зоны” [Толстихин, 1941]), была составлена Н.И. Толстихиным еще в 1933 г. Основное внимание в классификации уделено размещению скоплений подземных вод по отношению к “мерзлой зоне”. Н.И. Толстихин предложил выделять “надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные воды”.

Позднее, не меняя принцип выделения основных типов подземных вод, Н.И. Толстихин неоднократно дополнял и расширял свою классификацию (в 1941, 1956 г. и т. д.). Один из последних вариантов классификации Н.И. Толстихина, составленный совместно с О.Н. Толстихиным, представлен в табл. 2.

Предложенные Н.И. Толстихиным принцип классификации и терминология прочно укрепились среди гидрогеологов. Так, Н.А. Вельмина пишет: “Поскольку разделение подземных вод по отношению к мерзлым породам является главным, устареть основы классификации Н.И. Толстихина не могут, и в этом смысле классификация Н.И. Толстихина будет правомочна всегда, независимо от того, какие классификации будут предложены в дальнейшем. ...Любые классификации будут включать упомянутую схему” (имеется в виду схема деления подземных вод на над-, меж- и подмерзлотные. – С.Ф.) [Вельмина, 1970, с. 45]. В этом отношении она оказалась права. Все последующие классификации (а их более 15)²³ в той или иной мере изменяли или дополняли классификацию Н.И. Толстихина, однако принцип классификации

²¹ В субмаринных гидрогеологических структурах (см. рис. 1) питание, движение и разгрузка подземных вод осуществляются по водопоглощающим, водопроводящим и водовыводящим водно-химическим таликам [Фотиев, 1978, 2009б]. Субмаринные гидрогеологические структуры до настоящего времени изучены недостаточно.

²² Питание и разгрузка водоносных горизонтов в АБ КО, особенно в зоне сплошного распространения КВ, происходят только по тектоническим разломам, т. е. по существу жильными водами.

²³ Приведем лишь некоторых авторов, классификации которых были опубликованы в разные годы: 1940 г. – И.Я. Баранов, 1958 г. – Д.В. Редозубов, 1959 г. – В.М. Пономарев, 1960 г. – А.И. Калабин, 1964, 1982 гг. – С.Е. Суходольский, 1966, 1982 гг. – Н.Н. Романовский, 1970 г. – Н.А. Вельмина, 1983 г. – В.В. Шепелев.

Таблица 2. Классификация гравитационных подземных вод мерзлой зоны [Толстихин, Толстихин, 1973а]

| Тип подземных вод | Положение в рельефе | Местонахождение водоносных пород | Основной источник питания | Преобладающие напоры, элементы режима | Температура | | |
|--|---|---|--|---|--|--------------------------------------|-----|
| Надмерзлотные | Деятельный слой (верховодка) | Каменные россыпи и гольцы | Осадки, конденсация | Сезоннопромерзающие, безнапорные, при промерзании могут приобретать напор, нисходящие | + | | |
| | | Горные склоны Плоские водоразделы, равнины, речные террасы и поймы | Осадки Осадки, паводковые воды Речные воды | | + | | |
| | Деятельный слой и несквозные талики | Равнины и речные террасы, основания склонов гор, озерных котловин (выше местного базиса эрозии) | Осадки | Сезоннополупромерзающие, безнапорные, при промерзании приобретают временный напор | – (редко) | | |
| | | Несквозные талики | Конусы выноса Под озерами Под речными руслами и в низких террасах Морские побережья | | Осадки и речные воды Озерные воды Речные воды или воды сквозных таликов (в пределах их надмерзлотного рассеивания) Осадки и воды моря | + | |
| Межмерзлотные | Полностью изолированные талики | В различных условиях рельефа и геологического строения | Питание извне не поступает | Безнапорные или слабонапорные | – | | |
| | | Несквозные талики | Днища промерзающих озерных котловин и аласов Речные террасы | | Поверхностные воды | Напорные | + – |
| | Сквозные талики | Зоны разломов, пересекающие различные элементы рельефа | Поверхностные (речные) воды, реке воды сквозных таликов | Поверхностные (речные) воды, реке воды сквозных таликов | Напорные | + | |
| | | Под озерами (подозерные талики) | Поверхностные воды (на участках пересечения разломами речных долин) | Поверхностные воды | Непромерзающие, безнапорные, локальнонапорные | + | |
| | | Долины рек (под руслами и поймами – горные, равнинные) | Поверхностные воды | Подмерзлотные воды (озера-источника) | Поверхностные воды | Слабонапорные | + |
| | | | Конусы выноса, зоны разломов | Подмерзлотные или поверхностные воды | Подмерзлотные воды (озера-источника) Поверхностные или подмерзлотные воды То же | Напорные, восходящие | + |
| Подмерзлотные | Взаимосвязанные с водами сквозных таликов | Межгорные впадины | Поверхностные воды | Напорные со сравнительно устойчивым напором | + | | |
| | | Плоскогорья и горные массивы | | | Глубинные | Напорные с сильно измененным напором | + |
| Не взаимосвязанные с водами сквозных таликов | Карстовые массивы Равнины и плоскогорья платформ | Равнины и плоскогорья платформ | Глубинные | То же | | + | |
| | | | | Напорные с устойчивым режимом | + – | | |

Таблица 3. Типизация криогенных водоупоров по распространению

| Криогенный водоупор | | | | | | |
|---------------------|--------------|------------|--------|--------------------|------------|-----------------------|
| Тип | | | Подтип | | | |
| Номер | Наименование | Площадь, % | Номер | Наименование | Площадь, % | Прерывистость |
| I | Сплошной | 95–100 | 1 | Сплошной | 95–100 | Ничтожная |
| II | Прерывистый | 50–95 | 2 | Слабопрерывистый | 75–95 | Весьма незначительная |
| | | | 3 | Сильнопрерывистый | 50–75 | Незначительная |
| III | Островной | 0–50 | 4 | Массивно-островной | 25–50 | Значительная |
| | | | 5 | Островной | 5–25 | Весьма значительная |
| | | | 6 | Редкоостровной | 0–5 | Весьма значительная |

Таблица 4.

Классификация подземных вод

| Подземные воды | | Характеристики, обусловленные геологическими и гидрогеологическими условиями | | | | | Характеристики, |
|----------------|----------------------------|--|--|------------------|--------------------------|---|--|
| Тип | Вид | Гидрогеологические структуры | Породы | Форма скопления | Характер движения потока | Характер напора | Условия залегания и химический состав |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Поровые | Грунтовые | Бассейн грунтовых вод | Галечники, пески супеси (all, el, dl, l, fgl, m) | Горизонт | Фильтрация | Ненапорные, иногда с сезонным напором | Выше КВ. Пресные, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ |
| | Артезианские | Артезианский бассейн | Осадочные: нецементированные или слабощементированные | Горизонт | Фильтрация | Напорные | Ниже КВ. 1. Пресные, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, если $M_{\text{КВ}} < M_{\text{ЗПВ}}$, и в ЗКТП. 2. Соленые, Cl-Na , если $M_{\text{КВ}} > M_{\text{ЗПВ}}$ и если породы КВ – соленые. 3. Подземных вод нет, если $M_{\text{КВ}} > M_{\text{ЗПВ}}$. |
| Трещинные | Артезианские | Артезианский бассейн | Осадочные слабо-метаморфизованные | Горизонт | Фильтрация | Ненапорные | Внутри КВ. Соленые, Cl-Na ; линзы криопэгов среди мерзлых засоленных пород |
| | | Адартезианский бассейн | Осадочные сильно-метаморфизованные | | | | |
| | Грунтовые | Бассейн грунтовых вод | Кора выветривания (осадочные, магматические и метаморфические) | Горизонт | Фильтрация | Ниже КВ. Пресные, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, если $M_{\text{КВ}} < M_{\text{ЗПВ}}$ | |
| | Криогенные | Криогенный бассейн | Магматические, метаморфические, осадочные сильно-метаморфизованные | Зона | Фильтрация | Напорные | |
| Карстовые | – | Артезианский или адартезианский бассейны. Гидрогеологический адмассив | Растворимые (известняк, доломит) | Горизонт, массив | Флюация | Ненапорные (нисходящие). Напорные (восходящие) | Ниже КВ. Пресные, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, если $M_{\text{КВ}} < M_{\text{ЗПВ}}$, и в ЗКТП |
| Разломные | Трещинные (тонкие трещины) | Артезианский или адартезианский бассейны | Магматические, метаморфические, осадочные сильно-метаморфизованные | Жила | Фильтрация | Ненапорные (нисходящие). Напорные (восходящие) | Внутри и ниже КВ. 1. Пресные, $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, если $M_{\text{КВ}} < M_{\text{ЗПВ}}$. 2. Соленые, Cl-Na , если $M_{\text{ПВ}} < M_{\text{ЗПВ}}$. Пресные только в пронизывающих таликах |
| | Жильные (зияющие трещины) | Гидрогеологический массив или гидрогеологический адмассив | | Жила | Флюация | Ненапорные (нисходящие). Напорные (восходящие) | |

Примечание. ЗКТП – зоны криогенной трещиноватости пород; КВ – криогенные водоупоры; АБ – артезианский бассейн; аАБ – адартезианский бассейн. **Талики:** ИнФ – инфильтрационные, ИНФл – инфлюационные, Ф – фильтрационные, Фл – флюационные, ННФ – ненапорно-фильтрационные, ННФл – ненапорно-флюационные, НФ – напорно-фильтрационные, НФл – напорно-флюационные. **Химический состав воды:** $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ – гидрокарбонатно-кальциевый, Cl-Na – хлоридный натриевый.

криогенной области

обусловленные геокриологическими условиями

| Зональные характеристики криогенных водоупоров | | | | | |
|--|--|---|---|---|---|
| Зона сплошного распространения ($T_{\text{п}} = -2...-14$ °С, $M_{\text{КВ}} = 100-600$ м, $F_{\text{КВ}} = 95-100$ %) | | Зона прерывистого распространения ($T_{\text{п}} = -1...-3$ °С, $M_{\text{КВ}} = 0-150$ м, $F_{\text{КВ}} = 50-95$ %) | | Зона островного распространения ($T_{\text{п}} = 0...-1$ °С, $M_{\text{КВ}} = 0-50$ м, $F_{\text{КВ}} = 0-50$ %) | |
| Области питания | Области разгрузки | Области питания | Области разгрузки | Области питания | Области разгрузки |
| 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Бассейны сосредоточены в породах: 1) сезонноталого слоя; 2) водопроводящих таликов в долинах рек; 3) водовмещающих таликов под озерами на междуречьях и в долинах рек. Области питания совпадают с областью распространения. Области разгрузки – в долинах рек | | | | | |
| Водопоглощающие ИнФл талики только по крупным разломам и в днищах долин; питание – речные воды | Водовыводящие НФл талики только по крупным разломам и в днищах долин | Водопоглощающие ИнФ и ИнФл талики на междуречьях и в днищах долин; питание – атмосферные осадки и речные воды | Водовыводящие ННФ, ННФл, НФ и НФл талики в днищах долин | Водопоглощающие ИнФ и ИнФл талики на междуречьях и в днищах долин; питание – атмосферные осадки и речные воды | Водовыводящие ННФ, ННФл, НФ и НФл талики в днищах долин |
| То же | То же | То же | То же | То же | То же |
| » | » | » | » | » | » |
| » | » | Водопоглощающие ИнФ и ИнФл талики по карстовым пустотам на междуречьях и в днищах долин; питание – атмосферные осадки и речные воды | Водовыводящие ННФ, ННФл, НФ и НФл талики по карстовым пустотам в днищах долин | Водопоглощающие ИнФ и ИнФл талики по карстовым пустотам на междуречьях и в днищах долин; питание – атмосферные осадки и речные воды | Водовыводящие ННФ, ННФл, НФ и НФл талики по карстовым пустотам в днищах долин |
| Водоносные породы проморожены | | Водопоглощающие ИнФ талики на междуречьях и в днищах долин; питание – атмосферные осадки и речные воды | Водовыводящие ННФ и НФ талики в днищах долин | Водопоглощающие ИнФ талики на междуречьях и в днищах долин; питание – атмосферные осадки и речные воды | Водовыводящие ННФ и НФ талики в днищах долин |
| Водопоглощающие ИнФл талики только в днищах долин; питание – речные воды | Водовыводящие НФл талики только в днищах долин | Водопоглощающие ИнФл талики в днищах долин; питание – атмосферные осадки и речные воды | Водовыводящие ННФл и НФл талики в днищах долин | Водопоглощающие ИнФл талики в днищах долин; питание – атмосферные осадки и речные воды | Водовыводящие ННФл и НФл талики в днищах долин |

Характеристики криогенного водоупора: $T_{\text{п}}$ – температура пород, $M_{\text{КВ}}$ – мощность, $F_{\text{КВ}}$ – площадь. **Генетические типы отложений:** all – аллювиальные, el – элювиальные, dl – делювиальные, l – озерные, fgl – флювиогляциальные, m – морские. Мощность: $M_{\text{ЗПВ}}$ – зоны пресных вод, $M_{\text{Пч}}$ – пород чехла АБ и аАБ.

и названия типов подземных вод оставались неизменными. Одни авторы превращали классификацию в слишком подробную и потому слишком длинную региональную схему [Калабин, 1960], другие – чрезмерно усложняли классификацию, вводя в нее новые непонятные и, скорее всего, лишние понятия и термины. Н.А. Вельмина [1970], например, включила в классификацию понятие “мерзлотно-гидрогеологический разрез”, выделяя в нем “воды верхнего, среднего и нижнего этажей”. Некоторые авторы дополняли классификацию, включая в нее новые подразделения. Так, Н.Н. Романовский [1983] добавил “внутримерзлотные воды”.

Итак, предложенные Н.И. Толстихиным названия основных типов подземных вод “мерзлой зоны” практически без изменения использовались гидрогеологами в многочисленных, в том числе современных, статьях и монографиях на протяжении более 75 лет. Тем не менее необходимо отметить следующее. Гидрогеологи, включая в свои классификации термины “над-, меж- и подмерзлотные воды” в качестве ведущего признака подземных вод КО, почему-то забывали, что КО занимает огромную территорию, которая весьма неоднородна по условиям криогенного преобразования толщ пород, а следовательно, и по площади распространения КВ (см. рис. 1). Например, в Западной Сибири – огромном, наиболее детально изученном регионе КО – достаточно уверенно выделены три субэаральные зоны. Площадь зоны сплошного распространения КВ занимает в этом регионе всего 30,9 %, площадь зоны прерывистого распространения – 20,8 %, а островного – 48,3 % [Фотиев, 2009б].

По мнению автора, термины “надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные воды” можно использовать только в качестве дополнительной характеристики и только в структурах, расположенных в зоне сплошного распространения КВ. В этой зоне КВ занимают 95–100 % площади, а прерывистость их ничтожная (0–5 %) (табл. 3). Эти термины ограничено (только при характеристике подземных вод под крупными массивами мерзлых толщ, занимающими большие площади) можно использовать в зоне слабопрерывистых КВ, площадь которых составляет 75–95 %, а прерывистость весьма незначительная (5–25 %). Однако в гидрогеологических структурах, расположенных в зонах прерывистого (площадь КВ 25–50 %) и островного (менее 50 %) распространения КВ, использовать термины “надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные воды” в качестве основных типов подземных вод уже нельзя. Особенно бессмысленно их выделение в южных районах КО, где площадь КВ составляет от 0 до 25 %, а их прерывистость весьма значительная (75–100 %). В этой зоне небольшие острова и мелкие массивы

мерзлых пород, площади которых часто совпадают с литологическими водоупорами, практически не влияют на условия формирования подземных вод в недрах структур. Именно по этим причинам автор не пошел по пути своих предшественников и не использовал в классификации в качестве основных типов подземных вод КО указанные термины.

Разрабатывая классификацию подземных вод КО (табл. 4), автор прежде всего исходил из того, что гидрогеологические структуры, содержащие скопления подземных вод различных типов, оформились до начала криогенного периода. На протяжении криогенного периода подземные воды оказывали активное тепловое сопротивление многолетнему промерзанию пород. Поэтому первичные сквозные талики гидрогенного класса существовали и существуют даже в самых суровых геокриологических условиях Арктики. Гидрогеологические условия в недрах структур изменились. Мощность зоны криогенного преобразования толщ пород и подземных вод в разных геокриологических зонах составляла от 10–30 до 1500 м и более. При этом скопления различных типов подземных вод, залегающие во время криометаморфического цикла ниже КВ, по существу не менялись. Тем не менее изменились, также в результате формирования КВ, глубина залегания водоносных пород от поверхности земли и условия их питания, транзита и разгрузки. Гидрогеологические условия в одних структурах изменились в худшую сторону в силу формирования мощных низкотемпературных КВ, в других – в лучшую сторону благодаря формированию криогенных трещин, которые в значительной степени увеличили водопроницаемость плотных кристаллических пород. Современные гидрогеокриологические условия любого района КО – это результат многолетнего взаимодействия подземных вод и толщ мерзлых пород. Именно поэтому в основу классификации подземных вод КО положена одна из важнейших с гидрогеологических позиций характеристика пород – их водопроницаемость. В классификации выделено четыре типа подземных вод: поровые, трещинные, карстовые и разломные (жильные). Они существенно различаются по удельной проницаемости пород, условиям водообмена и другим характеристикам. По условиям залегания, режиму и гидравлическим свойствам поровые и трещинные воды разделены на два вида – грунтовые и артезианские. По размерам трещин, а следовательно, по удельному объему и теплосодержанию потока воды, разломные воды подразделяются также на два вида – трещинные и жильные (см. табл. 4, графы 1, 2).

Классификация состоит из двух частей. В левой части классификации каждый тип и вид подземных вод охарактеризован с геологических и гидрогеологических позиций: приведены типич-

ные гидрогеологические структуры и состав слагающих их пород, форма скопления и наличие напора подземных вод, а также характер движения потока подземных вод (см. табл. 4, графы 3–7). По существу, эти характеристики не отличаются от характеристик тех же типов и видов подземных вод в недрах аналогичных структур за пределами КО.

В правой части классификации (см. табл. 4, графы 8–14) представлены результаты криогенного преобразования гидрохимической зональности подземных вод в недрах структур, а также закономерности дифференциации областей питания и разгрузки подземных вод в зависимости от удельного объема и теплосодержания нисходящих и восходящих потоков. Для каждого типа и вида подземных вод, во-первых, указаны условия залегания скоплений подземных вод относительно КВ, во-вторых, приведен химический состав подземных вод, залегающих выше, внутри или ниже КВ, в-третьих, оценена возможность существования скоплений пресных вод в недрах разных типов гидрогеологических структур в зависимости от мощности КВ и, в-четвертых, показана зависимость размещения фильтрационных и флюационных областей питания и разгрузки бассейнов подземных вод, приуроченных к водопоглощающим и водовыводящим таликам, от их тепловой устойчивости в разных геокриологических зонах²⁴ и на различных элементах рельефа.

ВЫВОДЫ

На протяжении криометаморфического цикла формирования подземных вод (последние 3,1 млн лет), совпадающего по времени с плиоцен-голоценовым криогенным периодом, в результате многолетнего промерзания пород и формирования криогенных водоупоров гидрогеологические условия в недрах геологических структур существенно изменились.

- Наличие КВ – характерная особенность недр гидрогеологических структур КО, которая позволяет называть их гидрогеокриологическими структурами.

- Криогенные водоупоры, сформировавшиеся в породах верхних, наиболее водообильных горизонтов земной коры, существенно повлияли на условия питания, транзита и разгрузки подземных вод. Изменилась гидрохимическая зональность подземных вод, а следовательно, и сама возможность существования скоплений пресных вод в недрах структур.

- Зависимость условий питания, транзита и разгрузки подземных вод от геотемпературного поля верхних горизонтов земной коры – отличительная особенность гидрогеологических условий в недрах структур КО. Именно поэтому взаимодействие атмосферных, речных, озерных и подземных вод осуществляется только по таликам криогенного класса, наличие которых определяется отепляющим влиянием природных вод. Размеры площадей питания, транзита и разгрузки подземных вод ограничиваются размерами водопоглощающих, водопроводящих и водовыводящих таликов.

- Широтная зональность геотемпературного поля КО ставит возможность существования областей питания и разгрузки в прямую зависимость от теплосодержания нисходящего или восходящего потока подземных вод. В любой геокриологической зоне тепловая устойчивость областей питания и разгрузки скоплений пресных вод в недрах структур определяется, с одной стороны, температурой пород и мощностью КВ, а с другой – удельной производительностью нисходящего или восходящего потока и их теплосодержанием.

- Области питания и разгрузки подземных вод по тепловой устойчивости предложено делить на флюационные и фильтрационные. Флюационные области питания и разгрузки приурочены к породам с высокой пористостью, значительной трещиноватостью (вплоть до зияющих трещин) и закарстованностью. Они наиболее устойчивы в тепловом отношении, так как отличаются большим удельным объемом и высоким теплосодержанием нисходящего или восходящего потока подземных вод. Особенно велика их тепловая устойчивость в сильнотрещиноватых или закарстованных породах вблизи новейших тектонических разломов. Площадь их незначительна, но их роль в водообмене существенна во всех геокриологических зонах. Особенно велика их роль в структурах, расположенных в зоне сплошного распространения КВ, где породы фильтрационных областей питания и разгрузки проморожены. В этой зоне речные воды – основной источник питания бассейнов подземных вод. Фильтрационные области питания и разгрузки приурочены к породам с невысокой пористостью или с незначительной трещиноватостью. Они малоустойчивы в тепловом отношении, так как отличаются небольшим удельным объемом и невысоким теплосодержанием нисходящего или восходящего потока подземных вод. Они отсутствуют в зоне сплошного распространения КВ, но занимают большие площади на междуречьях в зонах прерывистого и особенно острого распространения КВ. В этих зонах атмосферные осадки – основной источник питания бассейнов подземных вод, доля речных и озерных вод невелика.

²⁴ Более подробно влияние климатических и геокриологических характеристик каждой зоны на условия водообмена поверхностных и подземных вод рассмотрены ранее в [Фомин, 2009б].

• Наличие вблизи подошвы КВ сильнообводненной зоны криогенной трещиноватости – отличительная особенность гидрогеокриологических структур криогенной области. Наиболее значительная мощность (100 м и более) обводненной зоны характерна для структур, расположенных в южных районах современной КО и за ее пределами.

• В результате формирования КВ существенно сократились размеры бассейнов грунтовых вод. Скопления пресных вод сосредоточились только в породах СТС и в водно-тепловых таликах, расположенных либо в днищах долин под руслами рек, либо под озерами в долинах рек на междуречьях. Размеры бассейнов ограничены размерами таликов.

• При разработке принципов классификации подземных вод КО (см. табл. 4) автор в качестве исходного постулата принял следующие положения: 1) основные гидрогеологические структуры, содержащие скопления подземных вод разных типов, оформились до начала криогенного периода; 2) подземные воды на протяжении криогенного периода оказывали активное тепловое сопротивление многолетнему промерзанию пород; 3) в любом регионе КО современные гидрогеокриологические условия – результат многолетнего взаимодействия подземных вод и многолетнемерзлых пород. Именно поэтому в основу классификации подземных вод КО была положена важнейшая с гидрогеологических позиций характеристика пород – их водопроницаемость.

В классификации выделено четыре типа подземных вод: поровые, трещинные, карстовые и разломные (жильные). Они существенно различаются по удельной проницаемости пород, условиям водообмена и другим характеристикам. Поровые и трещинные воды дополнительно разделены на два вида – грунтовые и артезианские, так как они существенно различаются по условиям залегания, режиму и гидравлическим свойствам. Разломные воды также подразделены на два вида – трещинные и жильные, поскольку они существенно различаются по теплосодержанию потоков подземных вод.

В одной части классификации для каждого типа и вида подземных вод приведены типичные гидрогеологические структуры и состав слагающих их пород, форма скопления и наличие напора подземных вод, характер движения потока подземных вод. В другой части для каждого типа и вида подземных вод указаны условия залегания скоплений подземных вод относительно КВ, приведен химический состав подземных вод, залегающих выше, внутри или ниже КВ, в зависимости от мощности КВ оценена возможность существования скоплений пресных вод в недрах гидрогеоло-

гических структур и показана зависимость размещения фильтрационных и флюационных областей питания и разгрузки бассейнов подземных вод, приуроченных к водопоглощающим и водовыводящим таликам, от их тепловой устойчивости в разных геокриологических зонах и на различных элементах рельефа.

Литература

Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии / В.Т. Балобаев. Новосибирск, Наука, 1991, 193 с.

Безрукова Е.В., Кулагина Н.В., Летунова П.П., Шестакова О.Н. Направленность изменения растительности и климата Байкальского региона за последние 5 млн лет по данным палинологического исследования осадков озера Байкал // Геология и геофизика, 1999, т. 40, № 5, с. 735–745.

Вельмина Н.А. Особенности гидрогеологии мерзлой зоны литосферы (Криогидрогеология) / Н.А. Вельмина. М., Недра, 1970, 244 с.

Вильямс Д.Ф., Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А. и др. Комплексные исследования позднеплиоцен-плейстоценовых донных отложений озера Байкал – основа палеорекопструкций и диатомовой биостратиграфии // Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 1–2, с. 35–47.

Геологический словарь. М., ГНТИ, 1978, т. II, 456 с.

Гидрогеологическая карта СССР. М-6 1:5 000 000 / Гл. ред. И.К. Зайцев. Л., ВСЕГЕИ, 1966.

Губкин Н.В. Подземные воды верхнего течения реки Колымы / Н.В. Губкин. М., Изд-во АН СССР, 1952, 132 с.

Елисафенко Т.Н. Влияние процесса криогенного преобразования пород на обводненность угольных бассейнов Якутии и Дальнего Востока // Региональные геокриологические исследования. М., Наука, 1985, с. 84–93.

Ершов Э.Д., Максимова Л.Н., Левантовская Н.П., Медведев А.В. Мегациклы развития криосферы Земли в протерозое–кайнозое // Материалы Второй конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, т. 3, с. 97–105.

Зайцев И.К. Принципы гидрогеологического районирования и типизация гидрогеологических структур // Основные типы гидрогеологических структур СССР. Л., 1974, с. 5–9. (Тр. ВСЕГЕИ. НС; т. 229).

Зайцев И.К., Толстихин Н.И. Основы структурно-гидрогеологического районирования СССР // Тр. ВСЕГЕИ. Л., 1974. НС, т. 101, 534 с.

Калабин А.И. Вечная мерзлота и гидрогеология Северо-Востока СССР // Тр. ВНИИ-1. Магадан, 1960, т. XVIII, 470 с.

Каменский Г.Н. Гидрогеология СССР / Г.Н. Каменский, М.М. Толстихина, Н.И. Толстихин. М., Госгеолтехиздат, 1959, 365 с.

Карабанов Е.Б., Кузьмин М.И., Вильямс Д.Ф. и др. Глобальное похолодание Центральной Азии в позднем кайнозое согласно осадочной записи из озера Байкал // Докл. РАН, 2000, т. 370, № 1, с. 61–66.

Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А., Кузьмин М.И. и др. Оледенения и межледниковья Сибири – палеоклиматическая запись из озера Байкал и ее корреляция с западно-сибирской стратиграфией (эпоха прямой полярности Брюнес) // Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 1–2, с. 64–75.

- Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А. и др.** Ритмы позднего кайнозоя и климатические вариации Азии по данным глубоководного бурения дна озера Байкал // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск, Изд-во СО РАН, фил. "Гео", 2001, с. 146–159.
- Маккавеев А.А.** Классификация подземных вод // Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии. М., Гостопиздат, 1961, с. 87–97.
- Максимов В.М.** Классификация и краткая характеристика подземных вод: Справ. рук-во гидрогеолога / В.М. Максимов. Л., Недра, 1987, т. 1, с. 110–155.
- Овчинников А.М.** Общая гидрогеология / А.М. Овчинников. М., Госгеолтехиздат, 1955, 384 с.
- Пономарев В.М.** Подземные воды территории с многолетнемерзлыми породами // Основы геокриологии. М., Изд-во АН СССР, 1959, ч. 1, с. 328–364.
- Романовский Н.Н.** Подземные воды криолитозоны / Н.Н. Романовский. М., Изд-во Моск. ун-та, 1983, 232 с.
- Саваренский Ф.П.** Гидрогеология / Ф.П. Саваренский. М., ГОНТИ, 1939, 256 с.
- Суходольский С.Е.** Парагенезис подземных вод и многолетнемерзлых пород / С.Е. Суходольский. М., Наука, 1982, 152 с.
- Толстухин Н.И.** Подземные воды мерзлой зоны литосферы / Н.И. Толстухин. М.; Л., Госгеолтехиздат, 1941, 204 с.
- Толстухин Н.И.** Принципы структурно-гидрогеологического районирования территории Сибири // Материалы Комис. по изучению подземных вод Сибири и Дальнего Востока. Иркутск, Изд-во Сиб. отд-ния АН СССР, 1962, вып. 2, с. 3–15.
- Толстухин Н.И., Толстухин О.Н.** Криогенез и водоносность гидрогеологических структур // Очерки по гидрогеологии Сибири. Новосибирск, Наука, 1973а, вып. VI, с. 21–29.
- Толстухин Н.И., Толстухин О.Н.** Подземные и поверхностные воды территории распространения мерзлой зоны // Общее мерзлотоведение. Новосибирск, Наука, 1973б, с. 192–229.
- Толстухин О.Н.** Изменения гидрогеологических структур под воздействием глубокого промерзания недр // Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири. Новосибирск, Наука, 1984а, с. 61–68.
- Толстухин О.Н.** О методике составления карты мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири // Там же, 1984б, с. 68–72.
- Фотиев С.М.** Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна / С.М. Фотиев. М., Наука, 1965, 230 с.
- Фотиев С.М.** Классификация таликов гидрогенного класса // Материалы науч.-техн. конф. (Москва, 21–24 мая 1968 г.). М., ПНИИИС, 1968, с. 168–171.
- Фотиев С.М.** Геокриологические условия Средней Сибири / С.М. Фотиев, Н.С. Данилова, Н.С. Шевелева. М., Наука, 1974, 147 с.
- Фотиев С.М.** Гидрогеотермические особенности криогенной области СССР / С.М. Фотиев. М., Наука, 1978, 236 с.
- Фотиев С.М.** Криометаморфический цикл формирования подземных вод в недрах геологических структур России в четвертичном периоде // Геоэкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология, 2002, № 1, с. 5–17.
- Фотиев С.М.** Криохроны и термохроны юга Сибири за последние 5 миллионов лет (палеогеокриологическая интерпретация результатов исследований донных осадков озера Байкал) // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 1, с. 13–27.
- Фотиев С.М.** Геокриологические летописи Сибири // Криосфера Земли, 2009а, т. XIII, № 3, с. 3–16.
- Фотиев С.М.** Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты) / С.М. Фотиев. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2009б, 279 с.
- Фотиев С.М.** Геокриологические летописи России // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 4, с. 3–14.
- Фотиев С.М.** Химический состав и генезис воды, сформировавшей повторно-инъекционные пластовые льды на площади Бованенковского месторождения // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 3, с. 3–28.
- Фотиев С.М., Елисафенко Т.Н.** Основные закономерности криогенного преобразования подземных вод и толщ горных пород на угольных месторождениях Северо-Востока СССР // Мерзлотные и гидрогеологические исследования зоны свободного водообмена. М., Наука, 1989, с. 48–56.
- Хурсевич Г.К., Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А. и др.** Детальная диатомовая биостратиграфия озера Байкал в эпоху Брюнес и климатические факторы видообразования // Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 1–2, с. 108–129.
- Шепелев В.В.** Надмерзлотные воды криолитозоны / В.В. Шепелев. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2011, 170 с.
- Prokopenko A.A., Karabanov E.V., Williams D.F. et al.** Biogenic silica record of the Lake Baical response to the climate forcing during the Brunhes // Quatern. Res., 2001, vol. 55, p. 123–132.
- Shackleton N.J., Berger F., Peltier W.R.** An alternative astronomical calibration of the Lower Pleistocene timescale based on ODR site 677 // Trans. Roy. Soc. Edinburgh: Earth Sci., 1990, vol. 81, p. 251–261.

Поступила в редакцию
30 октября 2012 г.