

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

РАВНОВЕСИЕ ХЛОРИДНЫХ КАЛЬЦИЕВЫХ РАССОЛОВ ОЛЕНЁКСКОГО КРИОАРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА С ОСНОВНЫМИ ПОРОДООБРАЗУЮЩИМИ МИНЕРАЛАМИ

С.В. Алексеев¹, Л.П. Алексеева¹, С.Л. Шварцев^{2,3}, Н.С. Трифонов^{2,3}, Е.С. Сидкина⁴

¹ *Институт земной коры Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия, E-mail: salex@crust.irk.ru*

² *Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения РАН, Томск, Россия, E-mail: tomsk@igng.tsc.ru*

³ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, E-mail: trifonovnik@mail.ru*

⁴ *Институт геохимии РАН, Москва, Россия, E-mail: sidkinaes@yandex.ru*

Аннотация. В статье представлены результаты физико-химического моделирования равновесия хлоридных высокоминерализованных подземных вод с карбонатными, сульфатными и хлоридными минералами. Установлено, что для крепких рассолов Оленекского криоартезианского бассейна, расположенного на северо-востоке Сибирской платформы, характерно недонасыщение относительно основных породообразующих минералов. Этот факт дает основание предполагать разбавление метаморфизованных седиментационных рассолов на определенном этапе эволюции криолитозоны бассейна в криохроны и термохроны позднего плейстоцена и голоцена.

Abstract. In the article it is presented the results of physico-chemical modeling of equilibrium of the chloride ground brines with carbonate, sulphate and chloride minerals. It was found that strong brines of the Oleniek cryoartesian basin, which locates in the north-east of the Siberian platform, are undersaturated by the main rock-forming minerals. It may be due to dilution of metamorphosed sedimentary brines at a certain stage of cryolithozone evolution in the basin during Late Pleistocene and Holocene cryochrons and thermochrons.

Введение. Проблема генезиса крепких хлоридных кальциевых рассолов требует понимания причин взаимосвязи минерализации (солености) подземных вод и содержания основных компонентов, формирующих химический состав, определения степени насыщения подземных вод относительно водовмещающих пород, выяснения равновесности-неравновесности системы, в которой происходят процессы взаимодействия подземных вод и горных пород и преобразование состава рассолов. Состав и степень минерализации подземных вод зависит от многих факторов и процессов (геоморфологических и ландшафтных особенностей, состава вмещающих пород, гидродинамических и геокриологических условий, интенсивности биологических процессов и процессов криогенеза и др.). Для подземных вод повышенной минерализации – соленых вод и рассолов – особую роль играет интенсивность водообмена, т.е. время соприкосновения воды с горными породами, глубина и длительность миграции (Шварцев, 1998, Геологическая..., 2005). Ранее при изучении подземных рассолов Тунгусского артезианского бассейна, геологический разрез которого характеризуется региональным распространением соленосных отложений, а рассолоносные гидрогеологические формации тесно связаны с галогенными пластами, установлено, что равновесность рассолов с эвапоритовыми минералами предопределена их присутствием в рассолоносных толщах и контактом с водовмещающими породами в условиях затрудненного и весьма затрудненного водообмена (Букаты, 1999). Равновесие в геохимической системе, претерпевающей глубокую метаморфизацию, поддерживается на протяжении всей геологической истории. С некоторыми из породообразующих эвапоритовых и биогенных минералов в составе соленосно-карбонатных пород (кальцитом, доломитом, гипсом) равновесны

почти все рассолы, с другими (стронцианитом, сильвином) только подземные воды определенной минерализации (слабые и крепкие рассолы или крепкие и предельно насыщенные).

Оленекский криоартезианский бассейн (КАБ) сложен преимущественно терригенно-карбонатными и карбонатными породами, прорванными многочисленными кимберлитовыми и трапповыми телами. Здесь отсутствуют мощные выдержанные пласты каменной соли и типичные для Сибирской платформы хлоридные натриевые рассолы регионального распространения. Подземные воды представлены солеными водами и рассолами хлоридного кальциевого или магниево-кальциевого состава. Зона активного водообмена полностью заморожена, а в зоне затрудненного водообмена находятся подземные соленые воды и рассолы с отрицательной и положительной температурой. Трещины в горных породах заполнены цементными и инъекционными подземными льдами. Величина объемной льдистости пород составляет 10-30 %, а в отдельных горизонтах достигает 40-50 % (Алексеев, 2009).

Цель настоящей работы – на основе физико-химического моделирования равновесия в системе вода-порода и результатов экспериментальных исследований взаимодействия рассолов со льдом раскрыть особенности протекания геохимических процессов в Оленёкском КАБ в условиях глубокого охлаждения геологического разреза в позднем кайнозое.

Методы исследования и материалы. Исследование физико-химического равновесия и степени насыщения подземных вод Оленёкского КАБ относительно карбонатных, сульфатных и хлоридных минералов, распространенных в геологическом разрезе региона, выполнено на основе численного моделирования с помощью программного комплекса HydroGeo, который разработан в Томском Филиале ИГНГ СО РАН (Букаты, 1997, 1999). Он решает широкий круг геохимических задач на основе использования метода констант равновесия вне зависимости от минерализации и состава природного раствора. Особенно это актуально применительно к соленым водам и крепким рассолам. Модуль ВМ (гидрохимические расчеты) программного комплекса HydroGeo позволяет выполнить наиболее распространенные типы гидрогеохимических расчетов, связанных с ионно-солевым составом подземных вод и гидрогеохимическими процессами в системе вода-порода. Важно подчеркнуть, что алгоритм, в отличие от большинства других, не содержит принципиальных ограничений по солености и ионной силе растворов. Кроме того, с помощью вспомогательной процедуры может осуществляться выбор/перевыбор минимально необходимого списка участвующих в расчете компонентов раствора и минералов из всех имеющихся в базе термодинамических данных. Наличие такой настройки обеспечивает универсальность процедуры в отношении различных гидрогеохимических систем, включая систему рассол-порода.

Расчет равновесий подземных соленых вод и рассолов с основными минералами водовмещающих пород выполнен с использованием результатов химического анализа 110 проб подземных вод Оленекского КАБ, вскрытых в осадочных горных породах и кимберлитовых трубках на глубине 110-1750 м. Химический макрокомпонентный состав подземных вод проанализирован лабораторными методами (химическим, атомно-абсорбционным, спектрофотометрическим, хроматографическим и др.) в Аналитическом центре Института земной коры СО РАН (г. Иркутск). Пробы высококонцентрированных вод перед анализом разбавлялись в 100-1000 раз. Точность определения (в мг/дм³): Cl⁻, SO₄²⁻ – 1-2, Ca²⁺, Mg²⁺ – 0,4, Na⁺, K⁺ – 0,1, Br⁻ – 0,1, Sr²⁺ – 0,05.

При настройке модели для физико-химического моделирования степени равновесия рассол-порода в систему были включены основные ионы (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺,

K^+ , Sr^{2+} , Li^+ , Rb^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Br), ассоциаты (H_2CO_3 , Na_2SO_4 , $(NaSO_4)^-$, $NaBr$, $NaCl$, $MgSO_4$, $Mg(SO_4)_2^{2-}$, $MgBr_2$, $MgCl^+$, $MgCl_2$, $(KSO_4)^-$, K_2SO_4 , KBr , KCl , $(Ca(SO_4)_2)^{2-}$, $CaSO_4$, $CaBr_2$, $CaCl^+$, $CaCl_2$, HBr , $SrCl^+$, $SrCl_2$) и породообразующие минералы, типичные для геологического разреза бассейна (кальцит, доломит, магнезит, стронцианит, ангидрит, гипс, целестин, галит). Расчет активностей компонентов, выполненный для стандартных (лабораторных) и пластовых (реальных) условий, не показал существенного различия степени и характера насыщения подземных вод относительно основных породообразующих минералов.

Геологическое и мерзлотно-гидрогеологическое строение бассейна. Оленёкский КАБ расположен в северо-восточной части Сибирской платформы (рис. 1). Для преимущественно карбонатного геологического разреза бассейна характерно наличие рифогенных отложений среднего кембрия: эпифитоновых известняков, кавернозных доломитов, доломитизированных известняков.

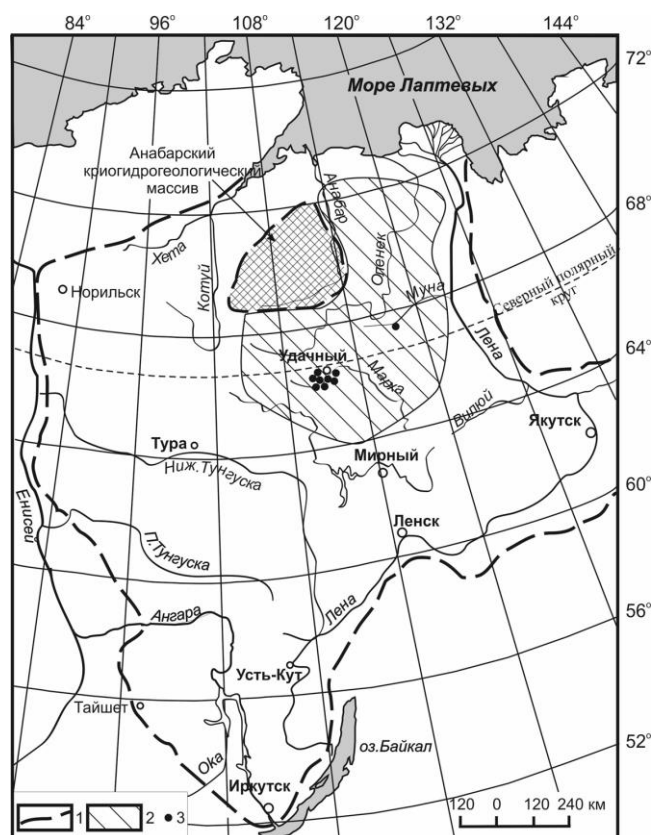


Рис. 1. Положение Оленёкского КАБ на Сибирской платформе. 1 – граница Сибирской платформы, 2 – Оленёкский КАБ, 3 – пункт гидрогеологического опробования.

Верхнекембрийские отложения имеют сходный состав и представлены карбонатными и глинисто-карбонатными, местами сульфатоносными породами. Широко распространены трапповые интрузии и кимберлитовые поля. Геокриологические условия бассейна определяются его положением в северной геокриологической зоне, сплошным распространением многолетнемерзлых пород, уникальной по мощности (более 1400 м) криолитозоной и низкой отрицательной температурой пород (до $-7,8^{\circ}C$ на подошве слоя годовых теплооборотов). Особенностью геокриологического разреза является наличие межмерзлотных и подмерзлотных криопэгов хлоридного состава с минерализацией до 425 г/дм^3 , залегающих на глубине 110-1000 м.

Специфику гидрогеологического разреза Оленекского бассейна формируют подземные воды E_3 , E_2 и V-E_1 водоносных комплексов, а также обводненные зоны кимберлитовых трубок и трапповых интрузий.

Подземные воды верхнекембрийского комплекса (E_3) входят в первую гидрохимическую зону соленых вод, слабых и крепких рассолов. Их минерализация изменяется в широких пределах - от 31 до 200 г/дм³. Среди катионов преобладают либо Ca, либо Mg. Доля Na достаточно высокая (11-30 %-экв.), иногда больше содержания Mg, что отражается в названии типа рассолов – они становятся натриево-кальциевыми. Анионный состав однозначно хлоридный, содержание SO_4^{2-} и HCO_3^- незначительное и в среднем составляет 0,98 и 0,12 г/дм³ соответственно. Значения Cl/Br (41-84) и rNa/rCl (0,1-0,4) отношений имеют узкий диапазон. Величина pH изменяется от 3,8 до 9 (табл. 1).

Подземные воды венд-нижне-среднекембрийских водоносных комплексов (V-E_1 - E_2) формируют вторую гидрохимическую зону крепких и весьма крепких рассолов. Минерализация рассолов изменяется от 207 до 425 г/дм³. Ведущим анионом является Cl^- , среди катионов доминирует Ca. Содержание Na, Mg и K находится в соотношении $\text{Na} > \text{Mg} \geq \text{K}$, причем максимальные абсолютные значения этих катионов не превышают 25 %-экв. Отношение Cl/Br составляет 27-73, rNa/rCl не превышает 0,3, величина pH составляет 2,8-7,1.

Таблица 1

Химический состав соленых подземных вод и рассолов Оленекского КАБ

Компоненты		Гидрохимическая зона	
		первая	вторая
Минерализация воды, г/дм ³		(31-196) 83	(207-425) 336
pH		(3,8-9,0) 6,6	(2,8-7,1) 4,7
Содержание, г/дм ³	K^+	(0,3-6,5) 1,8	(2,7-20,6) 12,5
	Na^+	(3,1-13,2) 6,6	(12,1-37,0) 23,3
	Mg^{2+}	(2,1-15,0) 6,4	(8,7-28,0) 14,2
	Ca^{2+}	(4,0-39,3) 13,3	(34,4-95,6) 69,7
	Cl^-	(18,6-125,0) 52,7	(130,1-258,0) 211,6
	Br^-	(0,3-2,4) 0,9	(1,1-6,5) 4,3
	SO_4^{2-}	(0,3-2,4) 1,0	(0,01-0,6) 0,2
	HCO_3^-	(0,03-1,0) 0,12	(0,01-0,7) 0,2
	Sr^{2+}	(0,03-0,8) 0,3	(0,6-2,1) 1,2
Cl/Br		41-81	27-73
rNa/rCl		0,1-0,4	0,1-0,3
Химический тип вод		Cl Mg-Ca, Ca-Mg, Na-Ca	Cl Ca, Mg-Ca, Na-Ca
Количество анализов		48	62

Примечание: в скобках – пределы значений, за скобками – среднеарифметическая величина.

Подземные воды, вскрытые в кимберлитовых трубках и трапповых интрузиях, гидравлически связаны с водоносными комплексами вмещающих осадочных горных пород. Они в целом идентичны по составу и минерализации.

Результаты физико-химического моделирования. Значительная часть рассолов первой гидрохимической зоны по отношению к карбонатным минералам (кальциту, доломиту, магнезиту и стронцианиту) находится в состоянии, близком к равновесному, о чем свидетельствует сгущение точек на диаграммах вблизи линии насыщения (рис.

2). Наименьшая степень насыщения характерна для слабых рассолов хлоридного Mg-Са или Са-Mg состава с минерализацией 54-57 г/дм³. Равновесное (или близкое к равновесному) состояние подземных вод обусловлено, вероятно, процессами взаимодействия в системе вода-порода: растворения и переноса вещества в результате конвекции (при больших скоростях водообмена) или молекулярной диффузии (при малых скоростях движения воды или отсутствии движения) в открытой системе. С течением времени эти процессы приводили к последовательному изменению химического состава рассолов и его глубокой метаморфизации. Рассолы второй гидрохимической зоны формируют на диаграммах область, значительно смещенную влево от линии насыщения карбонатными минералами – в поле недонасыщения. Этими минералами насыщена только некоторая часть кислых рассолов с минерализацией от 323 до 404 г/дм³ и рН от 3,7 до 4,8.

Относительно сульфатных минералов (ангидрита и целестина) подземные рассолы бассейна резко недонасыщены. Это предопределяется чрезвычайно малым (иногда нулевым) содержанием сульфат-иона, а также отсутствием сероводорода в составе крепких хлоридных кальциевых рассолов бассейна.

С хлоридами (галитом, сильвинном) равновесия подземных вод бассейна не наблюдается, что закономерно, поскольку содержание Na в рассолах, насыщающих преимущественно карбонатные отложения, невысокое - в среднем составляет 10-15 %-экв. Хлоридные Са рассолы второй гидрохимической зоны еще более резко недонасыщены галитом по сравнению с водами первой гидрохимической зоны. С другими хлоридными минералами (карналлитом, тахигидритом, бишофитом) подземные рассолы Оленекского КАБ также неравновесны.

Обсуждение результатов. Физико-химическое моделирование процессов в системе вода-порода показало различную степень равновесия рассолов Оленекского бассейна с основными минералами эвапоритовых фаций. Равновесное и неравновесное состояние относительно порообразующих минералов характерно также и для рассолов надсолевой, соленосной и подсолевой гидрогеологических формаций Тунгусского артезианского бассейна (Шварцев, Букаты, 1995; Букаты, 1999; Сидкина, Новиков, Шварцев, 2012).

Особый интерес представляет установленное в Оленекском бассейне существенное недонасыщение крепких рассолов карбонатами. Неравновесность подземных вод с карбонатными минералами могла быть вызвана рядом причин. Например, изменением интенсивности водообмена, времени взаимодействия воды с горными породами, Р-Т-условий или какими-то локальными причинами (Геологическая..., 2005). При относительном постоянстве этих факторов в ходе геолого-геохимической эволюции бассейна степень равновесия крепких рассолов с карбонатами могла измениться и в результате разбавления рассолов солоноватыми или пресными подземными водами.

Между тем на протяжении последних 3 млн лет подземные воды зоны активного водообмена в пределах Оленекского бассейна полностью проморожены. Горные породы, трещины и поры которых заполнены текстурообразующими льдами, слагают верхний ярус. Его подстилают охлажденные до -2...0 °С горные породы с напорными крепкими рассолами - криопэгами, образуя нижний ярус охлаждения. При таком строении мерзлотно-гидрогеологического разреза процесс разбавления рассолов, казалось бы, должен быть исключен.

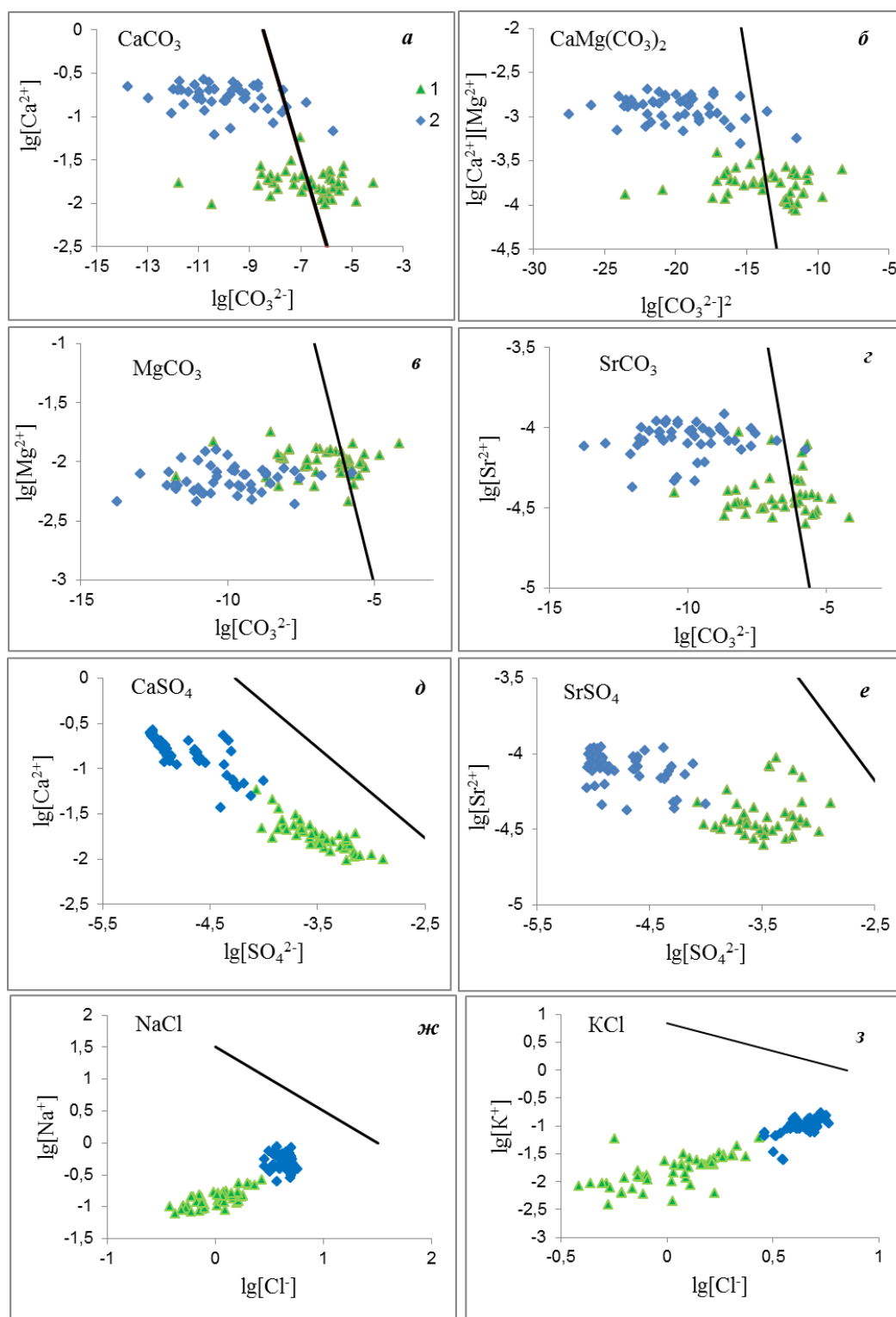


Рис. 2. Степень насыщения подземных вод Оленекского КАБ относительно карбонатных (а – кальцита, б – доломита, в – магнезита, г – стронцианита), сульфатных (д – ангидрита, е – целестина) и хлоридных (ж – галита, з – сильвина) минералов. Рассолы: 1 – первой гидрохимической зоны, 2 – второй гидрохимической зоны. Линии насыщения построены с использованием констант равновесия (Геологическая..., 2005 и Jackson et al., 1987).

Тем не менее, учитывая особую способность рассолов плавить лед при отрицательной температуре и высокую льдистость многолетнемерзлых пород, можно с уверенностью объяснить появление дополнительного объема воды, снижающего

величину минерализации рассолов при переходе льда в жидкую фазу. В целом, механизм плавления льда рассолами и процесс взаимодействия фаз достаточно хорошо изучен (Де Кервен, 1966; Пехович, Шаталина, 1968; Гайдаенко, 1986; Борисов, Алексеев, 1988; Федоров, 1989; Ершов и др., 1988, 1993; Лебедев, 1989, 1990; Современные изменения..., 1996 и др.). На основе экспериментальных исследований рассолов Западной Якутии и теоретического анализа составлена подробная сводка факторов взаимодействия рассолов со льдом (Pinneker, Alexeev, Borisov, 1989; Борисов, Алексеев, 2000). Из них к числу важнейших, определяющих необходимые условия для плавления льда и позволяющих объяснить появление дополнительного объема воды в системе рассол-лед, можно отнести соленость, температуру, объем жидкой и твердой фаз, а среди характеристик среды - положение рассолов ниже мерзлых пород и субгоризонтальную подошву мерзлоты. Результатами взаимодействия рассолов со льдом при отрицательной температуре могут быть полное или частичное плавление льда, опреснение и стратификация жидкой фазы по плотности, образование «вторичного» солоноватого льда, восстановление проницаемости мерзлых литифицированных горных пород, формирование протяженных таликовых зон.

Криолитозона Оленекского бассейна непрерывно существовала на протяжении 2,5 млн лет (Фотиев, 2006). Положение нулевой изотермы, которая в настоящее время находится на глубине 800-1400 м, колебалось, поднимаясь в криохроны и опускаясь в термохроны. Нарастание мощности криолитозоны происходило в основном снизу после проникновения волны охлаждения или потепления через толщу мерзлых горных пород и контактирующих с ними криопэггов. Средняя годовая температура пород повышалась, но не переходила через 0 °C. В подобной геокриологической обстановке источником дополнительного объема воды, снижающей величину минерализации рассолов, могли быть подземные текстурообразующие льды, плавление которых происходило при контакте с рассолами.

В криоартезианских бассейнах Западной Якутии контактирование отрицательно-температурных хлоридных рассолов (криопэггов) с многолетнемерзлыми породами прослеживается повсеместно. При современных температурах мерзлой толщи (в среднем -6...-2 °C, максимально до -13 °C) криопэги не замерзают, поскольку температура кристаллизации растворенных в них солей NaCl и CaCl₂ составляет -21,4 и -55 °C соответственно. При отрицательной температуре среды, более высокой, чем температура замерзания рассола, на границе лед-рассол нарушается термодинамическое равновесие, возникает концентрационная диффузия растворенных солей, в результате чего лед плавится, а концентрация рассола уменьшается. Взаимодействия в системе лед-рассол совершаются путем фазовых переходов воды, что сопровождается изменением объемов твердой и жидкой фаз и разбавлением концентрированных растворов (Алексеев, 2009).

Дополнительным опреснителем мог служить и определенный объем связанной воды, находящейся в дисперсном заполнителе осадочных и магматических горных пород. Связанная (незамерзшая) вода включает в себя воду, удерживаемую на минеральной поверхности частиц, и воду, присутствующую на поверхности льда. Известно, что прочносвязанная вода может находиться в жидком состоянии при отрицательной температуре, вплоть до -180 °C (Раковский и др., 1935). Однако при нарушении термодинамического равновесия в горном массиве и переходе температуры пород через значение температуры замерзания пленочной прочносвязанной воды возникает миграция незамерзшей воды под действием градиентов температуры, давления, электрического и других потенциалов (Основы геокриологии, 1995). Поступление новых порций маломинерализованных вод в более концентрированные

растворы и могло привести к разбавлению последних, что, в свою очередь, изменило параметр насыщенности подземных рассолов относительно карбонатных минералов.

Заключение. Изучение степени равновесия подземных рассолов Оленёкского КАБ с основными минералами водовмещающих пород методом физико-химического моделирования позволяет сделать ряд важных выводов.

Хлоридные Са, Mg-Са рассолы первой гидрохимической зоны находятся преимущественно в равновесии или весьма близки к состоянию равновесия относительно карбонатных и сульфатных (кроме ангидрита) минералов. Вероятно, это равновесие возникает в период образования водоносной системы и поддерживается на протяжении ее существования и эволюции за счет процессов растворения горных пород, конвективного и диффузионно-молекулярного переноса вещества.

Крепкие хлоридные Са рассолы второй гидрохимической зоны в основном недонасыщены карбонатными минералами, только часть рассолов с низкой величиной рН равновесна с кальцитом и доломитом. Причина такой неравновесности подземных вод может быть связана с историей развития системы вода-порода в последние несколько миллионов лет, когда началось преобразование геологического разреза в результате глобального похолодания климата и формирования криолитозоны значительной мощности. Взаимодействие рассолов с текстурообразующими льдами приводило к плавлению льдов, высвобождению определенного объема пресной воды, которая смешиваясь с рассолами, снижала их соленость. Параметр насыщенности рассолов мог измениться и в результате миграции незамерзшей прочносвязанной воды в дисперсном заполнителе литифицированных горных пород.

С хлоридными минералами все рассолы Оленёкского КАБ неравновесны, поскольку Са в значительной степени доминирует над Na и K, а в толще преимущественно карбонатных осадочных отложений при взаимодействии подземных вод с вмещающими породами не создается благоприятных условий для растворения Na и K и достижения насыщенного состояния рассолов относительно этих минералов.

Таким образом, в масштабе геологического времени формирование состава хлоридных рассолов после захоронения маточной рапы в терригенно-карбонатных толщах происходило в результате длительного взаимодействия с водовмещающими породами, на которое накладывались процессы криогенеза при глобальном плиоцен-плейстоценовом похолодании климата. При всех природных сценариях первичные эвапоритовые ассоциации горных пород постоянно контролируют химический состав рассолов и определяют особенности геохимической эволюции системы вода-порода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-01075). Авторы выражают благодарность к.г.-м.н. О.Е. Лепокуровой за содействие в выполнении работы и обсуждение результатов.

Литература

1. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 319 с.
2. Борисов В.Н., Алексеев С.В. К вопросу о взаимодействии рассолов и мерзлых пород // XII Всес. совещ. по подз. водам Востока СССР: Тез. докл. Иркутск - Южно-Сахалинск, 1988. С. 162.
3. Борисов В.Н., Алексеев С.В. Факторы взаимодействия рассолов со льдом (мерзлой породой) при отрицательной температуре // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже III тысячелетия. Томск, ТПУ, 2000. С. 584-589.
4. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения в области нефтегазовой геологии // Разведка и охрана недр. 1997. № 2. С. 37-39.
5. Букаты М.Б. Равновесие подземных рассолов Тунгусского бассейна с минералами эвапоритовых и терригенных формаций // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 5. С. 750-763.

6. Гайдаенко Е.П. Растворимость льда в мерзлых грунтах под воздействием соленых растворов // Проблемы инженерной гляциологии. Новосибирск: Наука, 1986. С. 32-36.
7. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 томах. Т. 1: Система вода-порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование/ В.А. Алексеев [и др.]; отв. редактор тома С.Л. Шварцев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 244 с.
8. Де Кервен М.Р. Растворение ледяных корок и предупреждение их возникновения // Лед и снег. М.: Мир, 1966. С. 447-456.
9. Ершов Э.Д., Лебеденко Ю.П., Чувилин Е.М. и др. Микростроение мерзлых пород. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 183 с.
10. Ершов Э.Д., Цу Ши Ше, Лебеденко Ю.П. и др. Процессы массопереноса и деформирования в мерзлых породах, взаимодействующих с водными растворами солей // Мат-лы. 3 науч.-техн. семин. «Инж.-геол. изуч. и оценка мерзлых, промерзающ. и оттаивающ. грунтов (ИГК-92)». Санкт-Петербург, 1993. С. 67-77.
11. Лебеденко Ю.П. Криогенная миграция ионов и связанной влаги в льдонасыщенных мерзлых породах // Инженерная геология. 1989. № 4. С. 21-30.
12. Лебеденко Ю.П. Механизм массопереноса и хемогенного формирования мерзлых пород при взаимодействии их с растворами солей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. 1990. № 4. С. 55- 6.
13. Основы геокриологии. Часть 1. Физико-химические основы геокриологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 368 с.
14. Пехович А.И., Шаталина И.Н. Экспериментальные исследования таяния льда в водном растворе // Тепло- и массоперенос. Минск, 1968. Т. 2. С. 98-104.
15. Раковский А.В., Тарасенков Д.Н., Командин А.В. Влияние посторонней твердой фазы на температуру замерзания воды и слабых водных растворов // Журнал общей химии. Том 5. Вып. 10. 1935. С. 1441-1444.
16. Сидкина Е.С., Новиков Д.А., Шварцев С.Л. Равновесие подземных рассолов западной части Тунгусского артезианского бассейна с минералами вмещающих пород // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 364. – С. 187-192.
17. Современные изменения в литосфере под влиянием природных и техногенных факторов / Под. ред. В.И. Осипова. М.: Недра, 1996. 222 с.
18. Федоров А.М. Лабораторные исследования разрушения льда и ледопородных монолитов рассолами // Условия и процессы криогенной миграции вещества. Якутск, 1989. С. 83-96.
19. Фотиев С.М. Современные представления об эволюции криогенной области Западной и Восточной Сибири в плейстоцене и голоцене (сообщение 2) // Криосфера Земли. 2006. Т. X, № 2. С. 3-26.
20. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-изд. М.: Недра, 1998. 336 с.
21. Шварцев С.Л., Букаты М.Б. О роли горных пород в формировании крепких рассолов хлоридно-кальциевого типа // Доклады РАН. 1995. Т. 342, № 4. С. 530-533.
22. Jackson K.J., Helgeson H.C. and Bowers T.S. Equilibrium Activity Diagrams. Springer. 1987, 397 p.
23. Pinneker E. V., Alexeev S.V., Borisov V.N. The interaction of brines and permafrost // Proc.WRI-6 Int. Symp. - Malvern-England: Rotterdam. Balkema, 1989. Pp. 557-560.