DOI: 10.31554/978-5-7925-0536-0-2018-6-9

ПРОБЛЕМНЫЕ АСПЕКТЫ ГЕОХИМИИ ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ И РАССОЛОВ

Алексеев С.В.¹, Алексеева Л.П.^{1,2}

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

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

АННОТАЦИЯ: В настоящей статье рассмотрены геохимические особенности подземных льдов в осадочных толщах и кимберлитовых трубках Якутской алмазоносной провинции, а также слагающих бугры пучения в Восточных Саянах, и подземных рассолов Оленекского криоартезианского бассейна. Охарактеризованы микрокомпонентный состав и распределение РЗЭ в подземных льдах, приведены результаты моделирования степени равновесия рассолов относительно основных породообразующих минералов водовмещающих осадочных толщ. К числу нерешенных геохимических вопросов отнесены отрицательная аномалия Eu в подземных льдах и недонасыщение крепких рассолов карбонатами.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эволюция подземной гидросферы тесно связана с общим ходом природных процессов на Земле. В областях распространения мерзлых пород протекание процессов взаимодействия в системе вода-порода характеризуется особенностями, обусловленными фазовыми переходами. В криогенных водоносных системах компонентами подземной гидросферы являются воды в твердой фазе и воды с большим содержанием растворенных солей – рассолы (криопэги). Генезис и особенности формирования химического состава этих типов подземных вод представляет несомненный научный интерес.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Подземные льды изучены в осадочных толщах и кимберлитовых трубках до глубины 250 м в пределах трех крупных алмазоносных районов Якутии и в буграх пучения с ледяным ядром в долине р. Сенца (Окинское плоскогорье, Восточные Саяны). Исследованные рассолы – это подмерзлотные подземные воды Оленекского криоартезианского бассейна (Западная Якутия). Макрокомпонентный состав расплавов льда и рассолов проанализирован по стандартным методикам в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН, содержание микроэлементов – в ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН методом ICP-MS.

3. ПРОБЛЕМЫ ГЕОХИМИИ ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ

Геохимические особенности отражают условия формирования льда в конкретной геологической среде при конкретном температурном режиме кристаллизации воды определенного химического состава. Установлено, что по

химическому составу ледяные ядра бугров пучения гидрокарбонатные натриево-кальциевые и кальциево-натриевые, минерализация расплава ледяного ядра не превышает 20 мг/дм³, а жидкой фазы из ледогрунта – до 150 мг/дм³. Речные и озерные воды имеют гидрокарбонатный кальциевый состав. Их минерализация составляет 84-132 и 125-192 мг/дм³. Для оценки содержания микрокомпонентов и редкоземельных элементов (РЗЭ) и выявления закономерностей их распределения определена концентрация 60 элементов в расплавах льда и поверхностных водах. Профили распределения микрокомпонентов и РЗЭ в ледяном ядре, ледогрунте одного из бугров пучения, в поверхностных водах (водах рр. Сенца, Жомболок, оз. Хухэ-Нур, двух малых озер) и дождевой воде представлены на рис. 1 и 2.

Микрокомпоненты. Кривые распределения микрокомпонентов в логарифмическом масштабе показывают в целом синхронное изменение содержания микрокомпонентов во льду, ледогрунте, поверхностных и дождевых водах. Можно было бы заключить, что возможным источником воды для формирования бугров пучения являются воды р. Сенца. Однако при анализе графиков распределения абсолютного содержания микрокомпонентов в чистом льду и ледогрунте и сравнении их с дождевыми водами было установлено, что все пробы обогащены кремнием, фосфором, железом, алюминием и цинком, причем во льду повышенное содержание этих элементов прослеживается по всей мощности ледяного ядра (от 0,3 до 1,2 м). В ледогрунте и в поверхностных водах зафиксирована только повышенная концентрация кремния (максимальная – 5785 мкг на глубине 6,4 м).

Рис. 1. Содержание микрокомпонентов в ледяном ядре, ледогрунте бугра пучения (на разной глубине), поверхностных водах и дождевой воде в долине р. Сенца.

Очевидно, что источник поступления цинка и фосфора в подземный лед – это дождевые воды, которые, инфильтруясь сквозь обогащенные железом и алюминием почвы, накапливали эти элементы в своем составе и обеспечивали их привнос в формирующееся ледяное ядро. Высокое содержание кремния во льду и ледогрунте, вероятно, обусловлено участием в процессе сегрегационного льдообразования подземных вод подрусловых и подозерных таликов, гидравлически связанных с поверхностными водами.

Редкоземельные элементы. Содержание РЗЭ в ледяных ядрах бугров пучения в целом изменяется от десятитысячных долей мкг/дм³ для тяжелых РЗЭ до 0,51 мкг/дм³ для легких РЗЭ. Для чистого льда характерно высокое содержание La, как и в воде р. Сенца. Концентрация других РЗЭ на 1-2 порядка больше, чем в речных и озерных водах.

Спектры распределения РЗЭ во льду и ледогрунте бугров пучения не похожи на спектры их распределения ни в дождевых водах, ни в водах региональных рек и озер (рис. 2). Более того, при сравнении с подземными льдами в осадочных породах и кимберлитах Западной Якутии, а также в воде р. Сытыкан обнаружена несхожесть спектров. Для текстурообразующих льдов и речных вод Западной Якутии свойственны ярко выраженная положительная европиевая аномалия и примерно равное содержание легких и тяжелых РЗЭ. Для ледяного ядра бугра пучения, напротив, характерна отрицательная аномалия Eu и небольшое преобладание легких РЗЭ над тяжелыми. В нижележащей льдоминеральной части бугра пучения установлена повышенная концентрация Eu, однако профиль не имеет чет-

кой Λ-образной формы, типичной для подземных льдов. Отрицательная аномалия европия характерна для аэрозолей Атлантического океана [4] и дождевой воды над океанами [5]. С чем связана отрицательная аномалия Eu в ледяном ядре бугра пучения, который сформировался в Алтае-Саянской горной стране (практически в центральной части Евразийского континента)? Этот вопрос требует своего решения. На формирование климата региона существенное влияние оказывают западные воздушные массы, с которыми связано выпадение основного количества осадков, а также континентальный воздух умеренных широт в предгорьях Алтая и Саян.

Рис. 2. Среднее содержание РЗЭ в пробах воды (нормализованное на NASC – Северо-Американский сланец). В долине р. Сенца: 1 – дождь, 2 – ледяное ядро бугра пучения, 3 – ледогрунт бугра пучения; 4 – р. Сенца, 5 – оз. Хухэ-Нур; 6 – р. Жомболок; в Западной Якутии: 7 – лед в осадочных породах, 8 – лед в кимберлитах, 9 – р. Сытыкан.

Распределение РЗЭ в ледяном ядре бугра пучения отражает обстановки формирования отложений. Тип литогенеза характеризует отношение $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ (где $\Sigma\text{Ce}=\Sigma(\text{La-Gd})$, $\Sigma\text{Y}=\Sigma(\text{Tb-Lu,Y})$), а его значение 2,5-4 выступает границей аридного и гумидного климатов: $<2,5$ – аридные, >4 – гумидные климатические условия. В ледяном ядре отношение $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ в среднем составляет 3,6, что свидетельствует о переходном типе климата между аридным и гумидным в период формирования бугра пучения.

4. ПРОБЛЕМЫ ГЕОХИМИИ РАССОЛОВ

Подземные воды Оленекского криоартезианского бассейна (КАБ) в Западной Якутии формируют две гидрохимические зоны. В I зону входят хлоридные соленые воды, слабые и крепкие рассолы с широким диапазоном минерализации – от 31 до 200 г/дм³. Среди катионов преобладают либо кальций, либо магний. Значения Cl/Br (41-84) и rNa/rCl (0.1-0.4) отношений имеют небольшой диапазон. Величина pH изменяется от 3.8 до 8. Во II зону включены хлоридные кальциевые крепкие и весьма крепкие рассолы с минерализацией от 207 до 425 г/дм³. Хлор-бромное отношение составляет 27-73, натрий-хлорное – не превышает 0.3, величина pH 2.8-7.1.

В результате изучения степени равновесия подземных рассолов Оленёкского КАБ с основными минералами водовмещающих пород методом физико-химического моделирования (программный комплекс HydroGeo) установлено, что большая часть рассолов I гидрохимической зоны находится в равновесии или весьма близка к состоянию равновесия карбонатными минералами. Этот результат оказался ожидаемым, поскольку в сходных гидрогеологических структурах (например, Тунгусский артезианский бассейн) насыщенное состояние рассолов кальцитом, доломитом обоснованно объясняются такими процессами взаимодействия в системе вода-порода, как растворение и перенос вещества в результате конвекции или молекулярной диффузии в открытой системе [2, 6, 7]. Вероятно, равновесное состояние рассолов I гидрогеохимической зоны Оленекского КАБ обусловлено такими же процессами взаимодействия в системе вода-порода.

Другой результат, полученный в процессе моделирования, касается рассолов II гидрохимической зоны, большая часть которых оказалась недонасыщена относительно карбонатных,

сульфатных и хлоридных минералов. Причина такой неравновесности подземных вод может быть связана с историей развития системы вода-порода. В ходе позднекайнозойской геолого-геохимической эволюции Оленекского бассейна степень равновесия крепких рассолов с карбонатами могла измениться в результате разбавления рассолов соленоватыми или пресными подземными водами. Взаимодействие подмерзлотных рассолов с текстурообразующими льдами на контакте жидкой и твердой фаз при отрицательной температуре среды приводило к плавлению льдов, высвобождению определенного объема пресной воды, которая смешиваясь с рассолами, снижала их соленость. Кроме того, параметр насыщенности рассолов мог измениться и в результате миграции незамерзшей прочносвязанной воды в дисперсном заполнителе литифицированных горных пород, а также при разрушении газогидратов в процессе взаимодействия с рассолами. Все эти дополнительные порции пресных или слабоминерализованных вод могли привести к уменьшению минерализации крепких рассолов и недонасыщению минералами водовмещающих пород [1].

Однако возникает вопрос – почему подземные воды, длительное время (миллионы лет) находясь в карбонатных толщах не достигают насыщения кальцитом, хотя известно, что в эксперименте равновесие раствора с карбонатами достигается за несколько часов. В реальных пластовых условиях при температуре -2, -3 °С, давлении 1.4-1.8 МПа и pH 2-4 крепкие и весьма крепкие хлоридные кальциевые рассолы не насыщены карбонатами. Насыщение рассолов подобного состава может быть достигнуто только в нейтральной среде (pH 6-7). Измерение водородного показателя портативным pH-метром HANNA непосредственно на устье самоизливающейся скважины, пробуренной в глубоких горизонтах кимберлитовой трубки Удачная, показало значение pH 4-4,5, причем время стабилизации этого значения достаточно велико, а иногда оно не достигает постоянной величины. Возможно, это связано с различием температуры изливающегося рассола (-2°С) и воздуха в камере шахты, которая составляет 8-10 °С. Известная обратная закономерность – понижение pH раствора при росте его температуры – не прослеживается в шахтных водах: значения pH в отобранных пробах рассолов, измеренные в лабораторных условиях при t 25°С, уже составляют 4,57-5,8.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования подземных льдов и высокоминерализованных подземных вод не позволяют на настоящем этапе однозначно ответить на все вопросы о формировании геохимических особенностей подземных льдов в буграх пучения и крепких рассолов глубоких горизонтов артезианских бассейнов.

Особенности микрокомпонентного состава подземных льдов бугров пучения в Восточных Саянах дают основание предположить, что вероятным источником воды, из которой формировалось ледяное ядро, являются атмосферные осадки. Однако этот тезис вступает в противоречие с первоначальной гипотезой смешанного сегрегационно-инъекционного происхождения ледяного ядра [3]. Явное различие спектров распределения редкоземельных элементов в подземных льдах бугров пучения и осадочных пород и кимберлитов объяснить пока не представляется возможным.

Недонасыщение хлоридных кальциевых крепких рассолов, залегающих в карбонатных толщах, к кальциту и доломиту, установленное при физико-химическом моделировании, требует дополнительного изучения равновесно-неравновесного состояния системы вода-порода в Оленекском криоартезианском бассейне.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 17-17-01158).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Шварцев С.Л., Трифонов Н.С., Сидкина Е.С. Особенности геохимической эволюции хлоридных кальциевых рассолов Оленекского криоартезианского бассейна в позднем кайнозое // Геохимия. 2017. № 5. – С. 429-444.
2. Букаты М.Б. Равновесие подземных рассолов Тунгусского бассейна с минералами эвапоритовых и терригенных формаций. Геология и геофизика, 1999. № 40(5). – С. 750-763.
3. Васильчук Ю.К., Алексеев С.В., Аржанников С.Г., Алексеева Л.П., Аржанникова А.В., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чиждова Ю.Н., Изотопный состав инъекционно-сегрегационной ледогрунтовой залежи в долине реки Сенца, Восточный Саян // ДАН. 2016. Том 471, № 6. – С. 697-702.
4. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. – М.: Наука, 2006. – 360 с.
5. Колесов Г.М., Аникеев В.В., Савенко В.С. Геохимические аспекты распределения редкоземельных элементов в системе океан-атмосфера // Геохимия, 1976. № 6. – С. 934-936.
6. 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.
7. Шварцев С.Л., Букаты М.Б. О роли горных пород в формировании крепких рассолов хлоридно-кальциевого типа // Доклады РАН. 1995. № 342(4). – С. 530-533.

PROBLEM ASPECTS OF GROUND ICE AND BRINES GEOCHEMISRY

Alexeev S.V.¹, Alexeeva L.P.^{1,2}

¹*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia, E-mail: salex@crust.irk.ru*

²*Irkutsk state university, Irkutsk, Russia*

ABSTRACT: The article presents the geochemical features of ground ice in sedimentary rocks and kimberlites pipes of the Yakutian diamond-bearing province and ground ice inside of frost mounds in the Eastern Sayan Mountains as well and ground brines of the Oleniok cryoartesian basin. Trace elements and REE distribution in ground ice are characterized; the simulation results of equilibria with respect of major rock-forming minerals of water-enclosing sedimentary rocks are presented. The unsolved geochemical issues are negative Eu anomaly in ground ice and strong brine undersaturation by carbonates.