



УДК 556.114.6.027 (571.56)

Изотопы хлора и брома в рассолах Западной Якутии

Л. П. Алексеева (lalex@crust.irk.ru),
С. В. Алексеев (salex@crust.irk.ru),
А. М. Кононов (kononov@crust.irk.ru),
Ма Тенг (mateng@cug.edu.cn),
Лю Юньде (lydcn84@126.com)

Аннотация. Представлены предварительные результаты изучения стабильных изотопов ^{37}Cl и ^{81}Br в подземных рассолах Западной Якутии. С целью уточнения генезиса высокоминерализованных подземных вод проведен сравнительный анализ с изотопными значениями хлора и брома в природных объектах геологической среды планеты Земля.

Ключевые слова: изотопы хлора и брома, подземные рассолы, кимберлиты, осадочные горные породы, система вода – порода.

Введение

Комплексные исследования особенностей распределения и закономерностей поведения стабильных изотопов (в том числе брома и хлора) в подземных водах позволяют на новом уровне решить проблемы, связанные с физико-химическим взаимодействием в системе вода – порода, выяснением генезиса подземных вод различного состава и минерализации, а также эволюционным преобразованием подземной гидросферы в целом. Содержание изотопов хлора (^{35}Cl и ^{37}Cl) в природных водах мало отличается от их содержания в океанских водах. Фракционирование изотопов хлора в подземных водах с малой скоростью фильтрации связано с процессами диффузии [4; 17]. Обоеднение ^{37}Cl поровых вод происходит в результате таких процессов, как фильтрация, дегидратация и глинизация (образование глинистых минералов) [6; 7; 16; 19], осаждение солей [8], испарение рассолов [21]. Существует Стандарт среднеокеанических хлоридов (SMOC – Standard Mean Ocean Chloride), значение $\delta^{37}\text{Cl}$ которого принимается за 0 ‰ [17]. Относительно этого стандарта измеряется изотопное отношение $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ для конкретного образца или пробы воды. Установлен диапазон изменений $\delta^{37}\text{Cl}$ для подземных вод в различных регионах мира: от –2,5 до +2,5 ‰ (SMOC).

Геохимия брома очень схожа с геохимией хлора, отсюда трудности отделения Br от Cl. Бром более подвержен окислению, чем хлор, и при окислении он превращается в газообразный Br_2 . В процессе испарительного концентрирования бром накапливается в растворе и соосаждается главным об-

разом с калиевыми и магниевыми солями (сильвин, карналлит, бишофит), не образуя чисто бромных минералов, кроме бромаргирита (AgBr).

Как известно, Br имеет два стабильных изотопа ^{79}Br и ^{81}Br примерно в равных количествах (50,686 и 49,314 % соответственно). Для определения изотопов брома используется Стандарт среднегокеанического брома (SMOB – Standard Mean Ocean Bromide), предложенный британскими исследователями [10]. Было установлено, что значения $\delta^{81}\text{Br}$ в подземных водах нефтяного месторождения Осеберг (Норвегия) положительные и варьируются от +0,08 до +1,27 ‰, что значительно выше, чем значения $\delta^{37}\text{Cl}$, изменяющиеся в пределах (–0,27...–4,96 ‰). Это позволило сделать вывод о различных путях фракционирования изотопов брома и хлора в природных водах. Последующие исследования показали, что в распределении изотопов брома большую роль могут играть процессы диффузии [11]. В 2005 г. разработан метод непрерывного потока – Continuous Flow Isotope Ratio Mass Spectrometry (CF-IRMS) [24], с помощью которого был определен новый диапазон вариаций стабильных изотопов брома в природных водах осадочных и кристаллических пород: 0,00...+1,80 ‰ относительно SMOB [23].

Данные об изотопном составе хлора и брома в подземных водах и породах активно используются гидрогеологами для установления, например, гидравлической связи между отдельными водоносными комплексами, степени взаимодействия подземных вод с вмещающими породами, для определения источников повышенной минерализации подземных вод, для идентификации эволюционных процессов в различных природных обстановках [12–14; 23; 25; 26].

Цель настоящей статьи – охарактеризовать особенности распределения и закономерности поведения галогенных изотопов в рассолах Западной Якутии, что позволяет существенно расширить представления о происхождении высокоминерализованных подземных вод и оценить степень участия вмещающих пород в формировании их состава.

Геолого-гидрогеологические особенности региона исследования

Объектами исследования явились подземные воды Оленёкского и северо-восточной части Якутского артезианских бассейнов Сибирской платформы, расположенных на северо-востоке Западной Якутии (рис. 1). Геологический разрез чехла платформы, вмещающий поликомпонентные рассолы, представлен палеозойскими и нижнемезозойскими осадочными отложениями мощностью до 2 500 м, которые прорваны большим количеством трапповых интрузий и кимберлитовых трубок. Верхняя часть осадочного разреза заморожена, а криолитозона в пределах региона достигает уникальной мощности – около 1 500 м. В меж- и подмерзлотной части разреза подземные воды вскрываются на глубине 100–2 500 м.

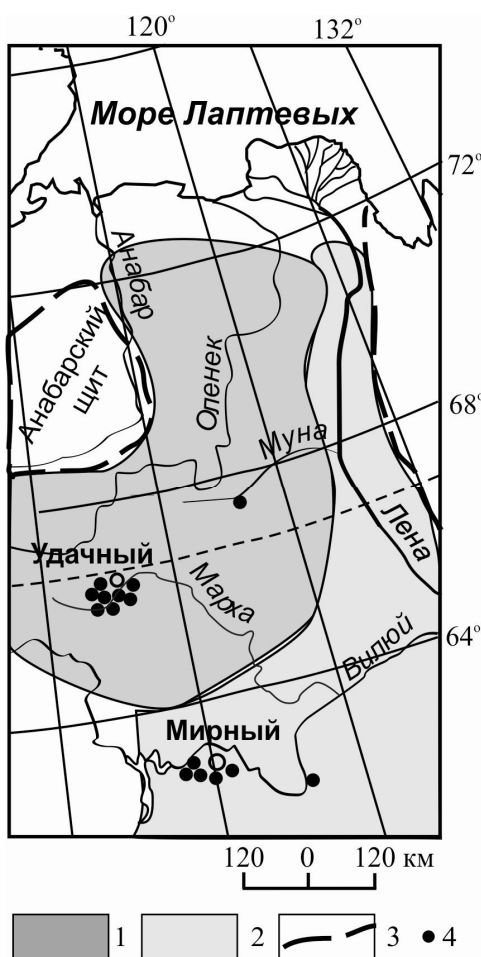


Рис. 1. Положение артезианских бассейнов (1 – Оленёцкого и 2 – Якутского) на Сибирской платформе, 3 – граница Сибирской платформы, 4 – пункт гидрогеологического опробования

изменчивы и представлены как терригенными, так и карбонатными, сульфатно-карбонатными образованиями венда-кембрия. Притоки хлоридных Mg-Ca рассолов соленосной нижнекембрийской гидрогеологической формации с минерализацией более 440 г/дм³ получены с глубины 600–800 м. Рассолы подсолевой гидрогеологической формации приурочены к терригенным и карбонатным разностям пород, залегающих на глубине более 1 500 м. По химическому составу они хлоридные Na-Ca, с минерализацией до 430 г/дм³.

Гидрогеологический разрез Оленёцкого артезианского бассейна представлен верхне-, средне-, нижнекембрийским и протерозойским водоносными комплексами, а также обводненными зонами кимберлитовых трубок. Подземные воды верхнекембрийского комплекса формируют гидрохимическую зону соленых вод, слабых и крепких рассолов. По химическому составу они являются хлоридными Mg-Ca, Ca-Mg и Na-Ca; минерализация вод изменяется в широких пределах – от 31 до 252 г/дм³. Подземные воды венд-нижне-среднекембрийских водоносных комплексов находятся в пределах гидрохимической зоны крепких и весьма крепких рассолов. По химическому составу воды хлоридные Ca, Na-Ca. Минерализация рассолов изменяется от 198 до 404 г/дм³. Подземные воды, вскрытые в кимберлитовых телах и гидравлически связанные с водоносными комплексами вмещающих осадочных горных пород, в целом идентичны по составу и минерализации. Они представляют собой хлоридные кальциевые рассолы с минерализацией от 140 до 380 г/дм³.

В северо-восточной части Якутского артезианского бассейна распространение рассолов контролируется пластами каменной соли. Водовмещающие породы фациально

Методы исследования

Для изотопных исследований использованы пробы слабых и крепких рассолов (с минерализацией от 40 до 434 г/дм³) из обводненных зон кимберлитовых трубок (Удачная, Зарница, Айхал, Нюрбинская, Мир) и карбонатных вмещающих пород в долинах рек Далдына и Муны. Пробы отобраны с различной глубины – от 197 до 1 567 м.

Химический макрокомпонентный состав подземных вод проанализирован стандартными лабораторными методами в Аналитическом центре Института земной коры СО РАН [3]. Анализы стабильных изотопов хлора и брома (³⁷Cl и ⁸¹Br) выполнены в Университете Ватерлоо (Онтарио, Канада) методом Isotope Ratio Mass Spectrometry (IRMS) и в Государственной ключевой лаборатории биогеологии и геологии окружающей среды Китайского университета геологических наук (г. Ухань) на масс-спектрометре Thermo Finnigan MAT 253 [5; 20].

Результаты исследования и их обсуждение

Обобщенные сведения о распределении изотопов хлора в геологической среде планеты представлены на рис. 2. Диапазон естественных вариаций изотопов хлора составляет в целом около 15 ‰: от –8 ‰ в поровых водах в зоне субдукции и до +7 ‰ в вулканических газах. В подземных водах различных регионов мира значение $\delta^{37}\text{Cl}$ изменяется от –2,5 до +2,5 ‰ (SMOC). Для подземных солоноватых вод (максимальная минерализация 9,3 г/дм³) Северо-Китайской равнины установлен узкий диапазон изменения изотопов хлора: –0,4...+0,07 ‰ [3]. В подземных водах Канадского и Фенноскандинавского щитов с различной минерализацией (от 1,9 до 258 г/дм³) этот диапазон шире и составляет –0,78...+0,98 и –0,54...+1,52 ‰ соответственно [27].

Для подземных вод интрузивных и осадочных пород Западной Якутии величина изотопного отношения хлора занимает более узкий диапазон: –0,40...+1,30 ‰ (SMOC), чем в подземных водах разных регионов мира, однако относительно океанских вод подземные растворы Западной Якутии обогащены тяжелым изотопом хлора.

В образцах галитовых ксенолитов кимберлитовой трубки Удачной (Западная Якутия), согласно опубликованным данным [22], значение $\delta^{37}\text{Cl}$ составляет –0,43...+0,47 ‰ (SMOC). Наши исследования показывают, что в подземных рассолах, насыщающих кимберлиты, величина $\delta^{37}\text{Cl}$ перекрывает этот диапазон в сторону положительных значений и колеблется в пределах –0,40...+0,74 ‰ (разброс 1,14 ‰) (табл.).

Немногочисленные данные о значении $\delta^{81}\text{Br}$ в подземных водах кристаллических и осадочных пород приведены в сводной диаграмме (рис. 3). Они свидетельствуют о близком подобии подземных вод Западной Якутии и осадочного бассейна Уиллистон (США), сложенного ранне-среднепалеозойскими преимущественно карбонатными породами, т. е. имеющего похожее строение геологического разреза. Значение $\delta^{81}\text{Br}$ в бассейне Уиллистон составляет –1,50...+2,83 ‰ (SMOB), а в подземных водах кембрийских карбонатных отложений Западной Якутии величина $\delta^{81}\text{Br}$ изменяется от –0,08 до +2,31 ‰ (SMOB).

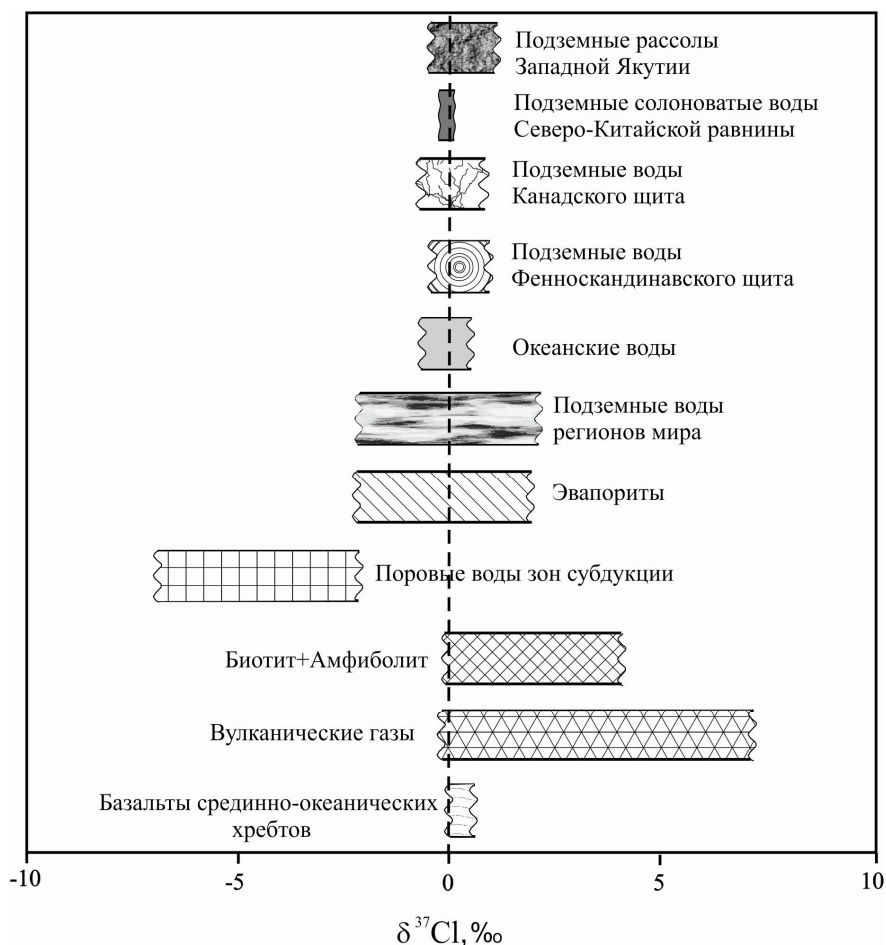


Рис. 2. Вариации $\delta^{37}\text{Cl}$ (SMOC) в природных водах, горных породах и газах планеты Земля [1; 3; 15; 27]

В подземных маломинерализованных водах Северо-Китайской равнины в пределах самой большой нефтегазовой площади в провинции Хубей, сложенной кайнозойскими песчаниками и аргиллитами, значения $\delta^{81}\text{Br}$ положительные: $+0,28 \dots +1,22$ ‰ (SMOB). В подземных водах кристаллических пород в пределах щитов они изменяются в других диапазонах: Канадский щит $+0,01 \dots +1,29$ ‰, Фенноскандинавский $+0,26 \dots +2,04$ ‰, нефтегазовая площадь Осеберг $+0,08 \dots +1,27$ ‰ (SMOB).

Значения $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ в подземных солоноватых, соленых водах и рассолах Канадского и Фенноскандинавского щитов, отобранных с разной глубины (19–1 800 м), показали существенную разницу диапазонов этих изотопных значений и поведения изотопов хлора и брома в кристаллических и осадочных породах, изученных ранее [14; 23; 24]. Для кристаллических пород характерны преимущественно положительные значения $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$, в то время как в подземных водах осадочных отложений диапазон изменения

$\delta^{81}\text{Br}$ в два раза превосходит область изменения $\delta^{37}\text{Cl}$, а отрицательные значения $\delta^{81}\text{Br}$ зафиксированы в большом количестве проб воды.

В Западной Якутии величина $\delta^{81}\text{Br}$ в подземных водах интрузивных пород (кимберлитов) составляет от $-0,17$ до $+0,52$ ‰ (SMOB), т. е. изотопное отношение брома сдвинуто в сторону негативных значений. Считается, что обогащение тяжелыми изотопами происходит в результате потерь ^{35}Cl и ^{79}Br в открытой системе вода – порода под воздействием ряда различных процессов, включая диффузию, испарение, окисление и др., в масштабе геологического времени [27]. Следовательно, облегченный изотопный состав Br в подземных водах обводненных зон кимберлитов, опробованных на глубине от 300 до 1 475 м, свидетельствует о закрытости (или неполной открытости) водоносных систем региона.

Таблица

Стабильные изотопы хлора и брома в хлоридных кальциевых подземных водах кимберлитовых трубок и вмещающих пород (серый цвет ячеек – хлоридные натриевые слабые рассолы)

№ скважины	Место отбора (водовмещающие породы)	Глубина отбора, м	Минерализация, г/дм ³	Cl ⁻ , г/дм ³	Br ⁻ , г/дм ³	$\delta^{37}\text{Cl}$, ‰	$\delta^{81}\text{Br}$, ‰
296	Рудник трубки Айхал (кимберлиты)	489	252	161	2,19	0,74	-0,17
406	Трубка Новинка (кимберлиты)	260	85,8	55,8	0,68	–	0,52
28/420	Трубка Нюрбинская (кимберлиты)	197	61,6	39,2	0,55	0,53	0,01
25-н	Р-н трубки Айхал (осадочные)	426	166	23	0,49	0,96	-0,15
244-а	Р-н трубки Юбилейная (осадочные)	458	162	107	1,32	0,62	–
КСС-3	Р-н трубки Удачная (осадочные)	1 050	407	102	1,89	0,22	–
9г	Трубка Удачная (кимберлиты)	500–550	323	203	3,65	-0,40	0,07
308	Р-н трубки Удачная (осадочные)	805–1 150	353	222	3,62	-0,35	0,07
703	Р-н трубки Удачная (осадочные)	1 390–1 567	396	244	4,91	-0,34	0,14
35	Р-н трубки Удачная (осадочные)	210	40	24	0,41	0,52	0,73
6	Р-н трубки Удачная (осадочные)	110–120	98	63	1,46	0,21	0,18
314	Р-н трубки Удачная (осадочные)	449–800	317	201	4,44	-0,22	0,18
24	Р-н трубки Удачная (осадочные)	313	91	57	0,85	-0,40	-0,80
330	Р-н трубки Удачная (осадочные)	504–750	316	197	3,09	-0,20	0,24

Окончание табл.

№ скважины	Место отбора (водовмещающие породы)	Глубина отбора, м	Минерализация, г/дм ³	Cl ⁻ , г/дм ³	Br ⁻ , г/дм ³	$\delta^{37}\text{Cl}$, ‰	$\delta^{81}\text{Br}$, ‰
310	Р-н трубки Удачная (осадочные)	834–1475	381	239	5,64	-0,27	-0,07
312	Р-н трубки Удачная (осадочные)	553–952	345	220	4,35	-0,24	-0,13
14	Трубка Зарница (кимберлит)	260–270	111	70	1,17	0,01	0,38
1ц	Долина р. Далдын (осадочные)	400–650	315	198	3,23	-0,23	-0,04
82	Трубка Мир (кимберлит)	600	435	279	4,71	-0,32	0,24
82	Трубка Мир (кимберлит)	884–1 024	363	231	3,82	-0,15	0,18
83	Трубка Мир (кимберлит)	600	388	247	3,42	0,04	0,27
204	Долина р. Муны (осадочные)	600–900	85,7	55,8	0,75	1,30	2,31
Анализы выполнены по методикам			[2]			[20]	[5]

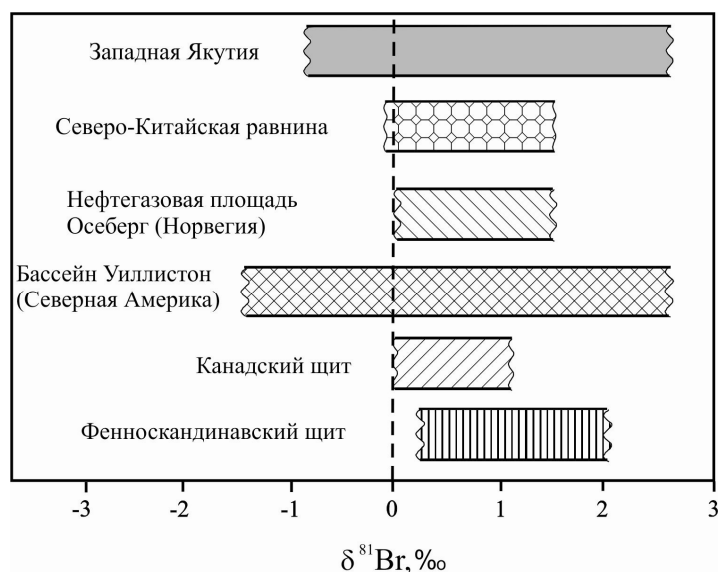


Рис. 3. Значение $\delta^{81}\text{Br}$ (SMOB) в подземных солоноватых, соленых водах и рассолах кристаллических и осадочных пород в некоторых регионах мира с привлечением данных: нефтегазовая площадь Осеберг [10]; бассейн Уиллистон [25]; Канадский и Фенноскандинавский щиты [27]

Следует отметить, что наиболее высокими значениями изотопов хлора и брома (+1,302 и +2,31 ‰ соответственно) обладают хлоридные натриевые слабые рассолы осадочных карбонатных пород в верховьях р. Муна (см. рис. 1). Причина этого пока не выяснена, но можно предположить, что источник обогащения изотопами хлора связан именно с водовмещающими породами. Карбонатные и силикатные минералы осадочных пород имеют в составе малое количество хлоридов и не рассматриваются как альтернативный источник хлора. Однако на контакте осадочного чехла и фундамента, вскрытого скважиной 204 на глубине 900 м, подземные соленые воды могли обогащаться изотопами хлора при длительном взаимодействии гидротермальных растворов с гнейсами и кристаллическими сланцами. Значение $\delta^{37}\text{Cl}$ для пород мантийного происхождения составляет приблизительно +4,7 ‰ [9]. Это обстоятельство, возможно, имело решающее значение для поступления изотопов хлора в древние океанические воды, которые впоследствии подвергались испарительному концентрированию и процессам метаморфизации.

Тесная корреляционная связь изотопов брома и хлора может указывать на единый источник поступления элементов в подземные воды и одинаковое влияние эволюционных геохимических процессов на преобразование системы вода – порода (рис. 4).

Несмотря на то что значения изотопов хлора и брома в рассолах верховьев р. Муны значительно превышают таковые в остальных пробах, они все же хорошо укладываются в линейную зависимость между $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ с высоким коэффициентом достоверности аппроксимации (0,8), характерную для подземных вод кимберлитов и осадочных отложений Западной Якутии.

Зависимости между а) содержанием иона хлора и величиной $\delta^{37}\text{Cl}$ и б) содержанием брома и значением $\delta^{81}\text{Br}$ показаны на рис. 5, где прослеживается разделение всех изученных рассольных вод на две группы. Первая группа включает в основном глубокозалегающие хлоридные кальциевые рассолы с высокой минерализацией – от 300 до 435 г/дм³. Они характеризуются высоким содержанием Cl-иона (> 196 г/дм³) и относительно узким диапазоном значений $\delta^{37}\text{Cl}$ (от –0,40 до +0,04 ‰). Вторая группа объединяет преимущественно слабые хлоридные кальциевые рассолы с минерализацией до 100 г/дм³, а также одну пробу хлоридного натриевого рассола с минерализацией 85 г/дм³. Для вод этой группы характерна низкая концентрация Cl (< 70 г/дм³) и гораздо больший разброс значений $\delta^{37}\text{Cl}$ (от –0,40 до +1,30 ‰).

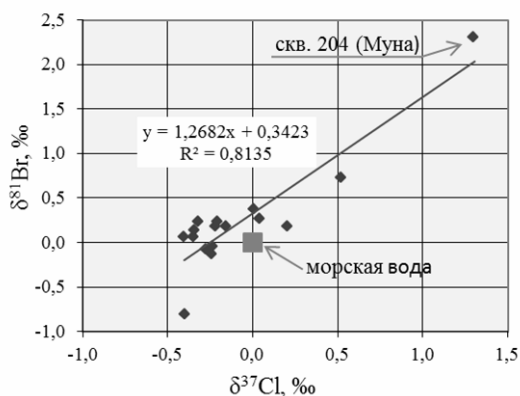


Рис. 4. Линейный тренд между $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ в подземных водах кимберлитовых трубок и вмещающих пород

Аналогичным образом изменяется и значение $\delta^{81}\text{Br}$, по которому подземные воды также разделяются на две группы (рис. 5, б). В группе крепких и весьма крепких рассолов содержание брома изменяется от 3094 до 5637 мг/дм³ при небольшом диапазоне изменения значения $\delta^{81}\text{Br}$ (–0,13...+0,38 ‰); для группы слабых рассолов, куда входит и проба хлоридного натриевого рассола, содержание брома составляет 412–1 458 мг/дм³, а значение $\delta^{81}\text{Br}$ варьируется от –0,80 до +2,31 ‰.

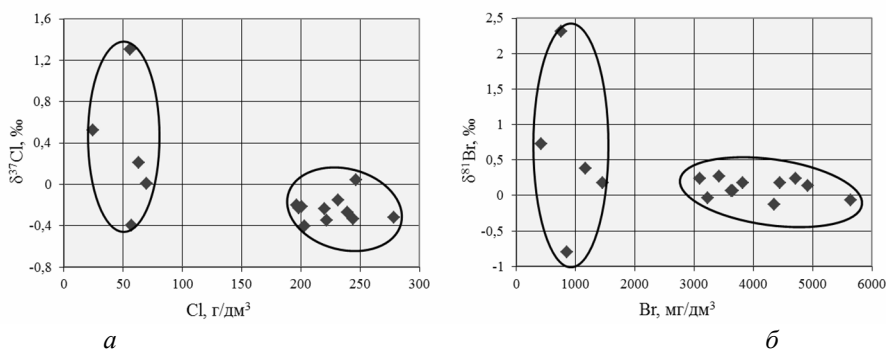


Рис. 5. Распределение галогенных изотопов в подземных рассолах кимберлитовых трубок и вмещающих осадочных пород: а) – $\delta^{37}\text{Cl}$ vs. Cl^- , б) – $\delta^{81}\text{Br}$ vs. Br^-

Из вышеизложенного следуют два важных вывода: 1) значения $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ контролируются абсолютным содержанием хлора и брома соответственно в составе рассолов и 2) изотопное фракционирование Cl и Br, по-видимому, происходило под влиянием различных процессов при формировании слабых, крепких и весьма крепких рассолов.

Заключение

1. Диапазон вариаций $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ в подземных рассолах Западной Якутии, приуроченных к обводненным зонам кимберлитовых трубок и осадочным вмещающим породам, составляет –0,40...+1,30 ‰ (SMOC) и –0,04 до +2,31 ‰ (SMOB) соответственно. Значения $\delta^{37}\text{Cl}$ не выходят за пределы, установленные для подземных вод различных регионов мира, однако относительно океанских вод подземные хлоридные растворы Западной Якутии обогащены тяжелым изотопом хлора. Хлоридные кальциевые и магниевые рассолы интрузивных пород (кимберлитов) характеризуются облегченным изотопным составом Br по сравнению с кристаллическими породами щитов и практически одинаковым диапазоном изменения $\delta^{81}\text{Br}$ с подземными водами осадочного бассейна Уиллистон (США).

2. Между изотопами брома и хлора наблюдается тесная корреляционная связь, что может указывать на единый источник поступления элементов в подземные воды и одинаковое влияние эволюционных геохимических процессов на преобразование системы вода – порода. С другой стороны, выделенные две группы рассольных вод по зависимости значения $\delta^{37}\text{Cl}$ и $\delta^{81}\text{Br}$ от содержания компонентов Cl^- и Br^- в рассолах могут свидетельство-

вать о различных процессах, влияющих на фракционирование этих изотопов при формировании слабых и крепких рассолов.

3. Выявленные особенности распределения стабильных галогенных изотопов в рассолах Западной Якутии отражают эволюционные процессы формирования высокоминерализованных подземных вод в результате метаморфизации седиментационных растворов в условиях закрытой системы и замедленного водообмена, начавшиеся в раннем кембрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-ГФЕН (проект № 14-05-91155).

Список литературы

1. Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы / С. В. Алексеев [и др.] // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 3. – С. 291–304.
2. Резников А. А. Методы анализа природных вод // А. А. Резников, Е. П. Муликовская, И. Ю. Соколов. – М. : Недра, 1970. – 488 с.
3. Origin and evolution of formation water in North China Plain based on hydrochemistry and stable isotopes (^2H , ^{18}O , ^{37}Cl and ^{81}Br) / L. T. Chen, Ma, Y. Du, J. Yang, L. Liu, H. Shan, C. Liu, H. Cai // Journal of Geochemical Exploration. – 2014. – N 145. – P. 250–259.
4. ^{37}Cl - ^{35}Cl variations in a diffusion controlled groundwater system / D. E. Desaulniers, R. S. Kaufmann, J. O. Cherry, H. W. Bentley // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1986. – N 50. – P. 1757–1764.
5. A precise analytical method for bromine stable isotopes in natural waters by GasBench II-IRMS / Y. Dua, T. Ma, J. Yanga, L. Liua, H. Shana, H. Caia, C. Liua, L. Chen // International Journal of Mass Spectrometry. – 2013. – N 338. – P. 50–56.
6. Stable chlorine isotopes in halite and brine from the Gulf Coast Basin: brine genesis / C. J. Eastoe, A. Long, L. S. Land, J. R. Kyle // Chemical Geology. – 2001. – N 176. – P. 343–360.
7. Stable chlorine isotopes in Phanerozoic evaporites / C. J. Eastoe, T. M. Peryt, O. Y. Petrychenko, D. Geisler-Cussey // Applied Geochemistry. – 2007. – N 22. – P. 575–588.
8. M. Chlorine stable isotope fractionation in evaporates / H. G. M. Eggenkamp, R. Kreulen, A. F. Koster Van Groos // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – N 59(24). – P. 5169–5175.
9. Eggenkamp H. G. M. A comparison of Cl and Br isotope fractionation in diffusion; geochemical consequences / H. G. M. Eggenkamp, M. L. Coleman // LPI Contrib. – 1997. – N 921. – P. 64.
10. Eggenkamp H. G. M. Rediscovery of classical methods and their application to the measurement of stable bromine isotopes in natural samples / H. G. M. Eggenkamp, M. L. Coleman // Chemical Geology. – 2000. – N 167. – P. 393–402.
11. Eggenkamp H. G. M. The effect of aqueous diffusion on the fractionation of chlorine and bromine stable isotopes / H. G. M. Eggenkamp, M. L. Coleman // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2009. – N 73. – P. 3539–3548.
12. The source of stable chlorine isotopic signatures in groundwaters from crystalline shield rocks / S. K. Frapе, G. Bryant, P. Durance, J. C. Ropchan, J. Doupe, R. Blomqvist, P. Nissinen, J. Kaija // Proceedings of the 9th International Symposium on Water Rock Interaction. – 1998. – P. 223–226.
13. Deep Fluids in the Continents: II. Crystalline Rocks / S. K. Frapе, A. Blyth, R. Blomqvist, R. H. McNutt, M. Gascoyne (ed. J. I. Drever) // Surface and Ground Water, Weathering, and Soils – Oxford : Elsevier – Pergamon, 2004. – Vol. 5. – P. 541–580.

14. Geochemical and isotopic characteristics of the waters from crystalline and sedimentary structures of the Bohemian Massif / S. K. Frape, O. Shouakar-Stash, T. Pačes, R. Stotler ; eds.: T. D. Bullen and Y. Wang // *Water Rock Interaction-12*, Kunming, China. – 2007. – P. 727–733.
15. *Heofs J. Stable isotope geochemistry / J. Heofs. – 6ed. – Springer, 2009. – 293 p.*
16. *Hesse R. Chlorine stable isotope ratios as tracer for pore-water advection rates in a submarine gas-hydrate field: implication for hydrate concentration / R. Hesse, P. K. Egeberg, S. K. Frape // Geofluids, 2006. – N 6. – P. 1–7.*
17. Chlorine stable isotope composition of Canadian Shield brines / R. Kaufman [et al.] // *Saline water and gases in crystalline rocks. Geol. Association of Canada Special Paper. – 1983. – P. 89–95.*
18. Natural chlorine isotope variations / R. S. Kaufmann, A. Long, H. Bentley, S. Davis // *Nature. – 1984. – N 309. – P. 338–340.*
19. Stable isotope geochemistry of dissolve chlorine in relation to hydrogeology of the strongly exploited Quaternary aquifers, North China Plain / X. Q. Li, A. G. Zhou, Y. D. Liu, T. Ma, L. Liu, J. Yang // *Applied Geochemistry. – 2012. – N 27. – P. 2031–2041.*
20. An online method to determine chlorine stable isotope composition by continuous flow isotope ratio mass spectrometry (CF-IRMS) coupled with a Gasbench II / Y. Liu, A. Zhou, Y. Gan, C. Liu, T. Yu, X. Li // *J. Central South University. – 2013. – N 20. – P. 193–198.*
21. Stable isotope fractionation of chlorine during evaporation of brine from a saline lake / C. G. Luo, Y. K. Xiao, H. Z. Ma, Y. Q. Ma, Y. L. Zhang, M. Y. He // *Chin. Sci. Bull. – 2012. – N 57(15). – P. 1833–1843.*
22. *Polozov A. G. Chlorine isotopes of salts xenoliths from Udachnaya-East kimberlite pipe / A. G. Polozov, H. Svensen, S. Planke // 9th Internat. Kimberlite Confer. Abstracts 9IKC-A-00000. – 2008. – Vol. 1. – P. 175.*
23. *Shouakar-Stash O. Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes of the deep ground waters, of the Siberian platform, Russia / O. Shouakar-Stash [et al.] // Applied Geochemistry. – 2007. – Vol. 22, issue 3. – P. 589–605.*
24. *Shouakar-Stash O. Determination of bromine stable isotopes using continuous-flow isotope ratio mass spectrometry / O. Shouakar-Stash, S. K. Frape, R. J. Drimmie // Analytical Chemistry. – 2005. – N 77. – P. 4027–4033.*
25. Variations of the $\delta^{81}\text{Br}$ and $\delta^{37}\text{Cl}$ stable isotope signature for pre-Mississippian formation waters of the Williston Basin / O. Shouakar-Stash, S. K. Frape, B. J. Rostron, R. J. Drimmie // *Goldschmidt Conference Abstracts 2006. Geochimica Cosmochimica – 2006. – Vol. 70, N 18. – A589.*
26. *Stiller M. The origin of brines underlying Lake Kinneret / M. Stiller, J. M. Rosenbaum, A. Nishri // Chemical Geology. – 2009. – N 262. – P. 293–309.*
27. *Stotler R. L. An isotopic survey of $\delta^{81}\text{Br}$ and $\delta^{37}\text{Cl}$ of dissolved halides in the Canadian and Fennoscandian Shields / R. L. Stotler, S. K. Frape, O. Shouakar-Stash // Chemical Geology. – 2010. – N 274. – P. 38–55.*

Chlorine and Bromine Isotops in Brines of the Western Yakutia

L. P. Alexeeva, S. V. Alexeev, A. M. Kononov, Ma Teng, Liu Yunde

Abstract. The results of study of stable isotopes ^{37}Cl and ^{81}Br in ground brines of the Western Yakutia have been presented. In order to clarify the genesis of highly mineralized ground water comparative analysis of chlorine and bromine isotopic signatures of the

natural objects of the geological environment (ground water, ocean water, rocks and gases) have been conducted.

Keywords: chlorine and bromine isotopes, ground brines, kimberlites, sedimentary rocks, water-rock system.

Алексеева Людмила Павловна
кандидат геолого-минералогических наук
старший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (395-2) 42-27-77

Alexeeva Ludmila Pavlovna
Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Senior Research Scientist
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (395-2) 42-27-77

Алексеев Сергей Владимирович
доктор геолого-минералогических наук
зав. лабораторией
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (395-2) 42-66-37

Alexeev Sergey Vladimirovich
Doctor of Sciences (Geology
and Mineralogy), Head of Laboratory
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (395-2) 42-66-37

Кононов Александр Матвеевич
кандидат геолого-минералогических
наук, научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (395-2) 42-27-77

Kononov Alexander Matveevich
Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Scientific Researcher
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (395-2) 42-27-77

Ма Тенг
кандидат геолого-минералогических
наук, декан
Школа изучения окружающей среды
Китайский университет геонаук
430074, Китай, Ухань
тел.: +86-2767883151

Ma Teng
Candidate of Sciences (Geology and
Mineralogy), Dean
School of Environmental Studies
China University of Geosciences
388, Lumo Road, Hongshan District
China, Wuhan, 430074
tel.: +86-2767883151

Лю Юньде
кандидат геолого-минералогических на-
ук, преподаватель
Школа изучения окружающей среды
Китайский университет геонаук
430074, Китай, Ухань
тел.: +86-2767883151

Liu Yunde
Candidate of Sciences (Geology
and Mineralogy), Professor
School of Environmental Studies
China University of Geosciences
388, Lumo Road, Hongshan District
China, Wuhan, 430074
tel.: +86-2767883151