Оценка подвижности химических элементов в системе базальты –природные воды – вторичные отложения территории Торейских озер (Восточное Забайкалье)

Дребот В.В.^{1,2}, Лепокурова О.Е.^{1,2}

Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, Россия,

E-mail: DrebotVV@ipgg.sbras.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

АННОТАЦИЯ: Для оценки подвижности химических элементов на начальном этапе взаимодействия системы базальты – природные воды – глины рассчитаны коэффициенты водной миграции K_x , и геохимической подвижности K_p , установлены ряды интенсивности миграции элементов в атмосферных, речных, озерных и подземных водах. Выделены элементы, склонные к осаждению с глинами, и элементы, склонные к накоплению в воде. Установлено, что в направлении атмосферные – речные – подземные – озерные воды интенсивно накапливаются в водах на всем протяжении эволюции – Cl, Na, S, U, W. Остальные элементы на разных этапах уходят во вторичные отложения.

Assessment of the mobility of chemical elements in the basalt-natural waters-secondary deposits system in the Torey lakes area (Eastern Transbaikalia)

Drebot V.V.^{1,2}, Lepokurova O.E.^{1,2}

¹Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Tomsk, Russia,

E-mail: DrebotVV@ipgg.sbras.ru

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

ABSTRACT: The water migration coefficients K_x and geochemical mobility K_p were calculated, and series of the element's migration intensity in atmospheric, river, lake, and ground waters were established, all to estimate the mobility of chemical elements at the initial stage of the interaction of the basalt – natural water – clay system. Elements that are prone to sedimentation with clays and elements that are prone to accumulation in water are distinguished. It has been established that in the direction of atmospheric - river - ground - lake water intensively accumulates Cl, Na, S, U, W in the waters throughout the evolution. The remaining elements at different stages go into secondary deposits.

ВВЕДЕНИЕ

Главным геохимическим агентом перераспределения химических элементов в земной коре является природная вода, которая участвует в разложении и осаждении минералов путем растворения, гидролиза, гидратации, седиментации и других процессов [6]. Вопрос оценки геохимической подвижности элементов, в том числе водной миграции, в условиях зоны гипергенеза детально разработан А.И. Перельманом [3]. Им был предложен коэффициент водной миграции, характеризующий условную скорость выноса химических элементов относительно кларковых их содержаний в горных породах. С.Л. Шварцев, в свете развиваемого им равновесно-неравновесного состояния системы вода-порода [5], показал, что «... значительная часть химических элементов концентрируется вторичными минеральными фазами...», а исходная (растворяемая) порода «...выступает практически неисчерпаемым источником элемента» [4]. Поэтому он предложил коэффициент геохимической подвижности, показывающий способность элемента концентрироваться в растворе относительно общей солености и доли, связываемой вторичными продуктами.

Авторы попытались в данной статье рассмотреть подвижность химических элементов, учитывая полную систему исходная порода – вода – вторичная порода с использованием обоих коэффициентов, а далее с попыткой их обобщения. В качестве исходных пород интересно было посмотреть базальты в рамках выполнения тематического гранта РНФ по механизмам взаимодействия вод с основными породами. Для этого выбрана территория Торейских озер, где встречены небольшие по площади покровы базальтов и андезито-базальтов мелового возраста, а разнообразие состава природных вод на ограниченной площади поражает. Поэтому в качестве водных объектов мы рассмотрели разные проявления на территории: атмосферные, речные, озерные, подземные, чтобы проследить разные этапы взаимодействия вода – порода. Таким образом, целью работы являлось изучение особенностей перераспределения химических элементов в системе базальты – вода – глины на территории Торейских озер для лучшего понимания условий формирования вод разного состава.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований приурочен к территории водосборных бассейнов бессточных озёр Зун- и

Барун-Торей Восточного Забайкалья (рис. 1). Основной особенностью природных условий здесь является резко континентальный, засушливый климат, а значит в формировании химического состава вод огромную роль играет испарение, ускоряющее процессы взаимодействия. Согласно геологическому строению впадина сложена песчано-глинистыми маломощными отложениями, перекрывающими эффузивно-осадочные меловые породы, выходящие на дневную поверхность в районе озер. Интенсивная трещиноватость вулканогенных структур обеспечивает смешение озерных, речных и подземных вод.

Полевые работы проходили в летние периоды 2017, 2018 и 2019 гг. совместно с сотрудниками ИПРЭК СО РАН (г. Чита). В разных сторонах от озер были отобраны 4 пробы атмосферных осадков. Для сбора воды было оборудовано углубление в земле, покрытое чистой полиэтиленовой плёнкой. Из двух основных рек Онон и Борзя отобраны по одной пробе воды, также взяты 10 проб озерных вод. Больше всего изучены подземные воды – 39 проб. Это родники, колодцы и скважины глубиной до 70 м. Всего проанализировано 55 природных источников вод. Для изучения поведения химических элементов в основном использовались данные ICP-MS, выполненные в аккредитованной Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Научно-образовательного центра «Вода» (ТПУ). Данные по макрокомпонентам (Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Si, Al, P, Cl, S) были получены в аттестованной лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН потенциометрическим методом, атомной эмиссией, пламенной абсорбцией, коллориметрическим методом.

В качестве исходных основных пород исследованы 5 образцов, определенные как метабазальты и оливиновые метадолериты. В качестве вторичных – 2 образца глинистых отложений (преимущественно гидрослюдистого состава), отобранные на берегу озера и у выхода родника. В данной работе использованы результаты ICP-MS и рентгенофлуоресцентного анализа (для Si, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti, P, Mn, Al), выполненные в центре коллективного пользования «Аналитический центр геохимии при родных системах» Томского государственного университета.

По Cl и S использованы литературные данные [2] по среднему составу базитов.

В расчетах были использованы средние значения для каждого типа вод и пород. В исследования вошли следующие химические элементы: Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Si, Al, P, Cl, S, Li, Be, B, Sc, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr,

Nb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Pb, Th, U.

Коэффициент водной миграции K_x (по А.И. Перельману) каждого элемента определяется по формуле:

$$K_x = (m_x * 100) / (a * n_x) \quad (1),$$

где a – сумма минеральных веществ, растворенных в воде, г/л; m_x – содержание того же элемента x в воде, г/л; n_x – содержание того же элемента породах, %.

Рис. 1. Схема отбора проб вод и пород

Коэффициент геохимической подвижности K_n (по С.Л. Шварцеву) определяется по формуле:

$$K_n = (m_x * 100) / (a * n_n) \quad (2),$$

где m_x и a – то же, что и в уравнении (1); n_n – содержание (%) исследуемого элемента в продуктах химического выветривания (в данном случае в глинах).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты по коэффициентам 50-ти химических элементов разных природных вод из-за объема в статье не представлены. Данные разбиты на ряды элементов по интенсивности выноса водами из базальтов на основе K_x (табл. 1) и ряды подвижности элементов в воде относительно связываемости вторичными отложениями на основе K_n (табл. 2).

Атмосферные осадки. Воды ультрапресные (10–50 мг/л), слабокислые (pH 5–6,5), сложного катионного и анионного состава, но в основном преобладают HCO_3^- и Na^+ . Более половины всех исследованных элементов характеризуются на этом этапе очень сильной, сильной и средней интенсивностью миграции ($K_x > 0,1$). Как видно (табл. 1), чем больше K_x , тем интенсивнее элемент выщелачивается. Однако уже на этом этапе, как показано в работах [1, 5], часть элементов высаживается с окислами и даже глинами.

Поэтому, например, такие элементы как Mn, Fe, Al, Si (табл. 2) отличаются слабой подвижностью ($K_n < 0,1$), т.е. слабо концентрируются в растворе относительно доли, связываемой вторичными продуктами.

Речные воды характеризуются низкой минерализацией (10–47 мг/л), но уже слабощелочной средой (pH 7,4–8,2), по составу гидрокарбонатные кальциево-натриевые. Всего четверть элементов (Cl, S, Na, Ca, Mg, K, Cs, Li, U, Sr, Zn, Cu, Si) на этом этапе отличаются хорошей миграцией и подвижностью (K_x и $K_n > 0,1$), т.е. активно накапливаются в воде.

Подземные воды. Неглубокие подземные воды отличаются большим разбросом значений pH и солёности. Выделяются условно две группы вод: 1) с минерализацией 0,3–0,7 г/л и pH 7,4–8,1, по составу $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ и 2) с минерализацией 0,7–4,8, pH 8,1–8,9, по составу в основном $\text{HCO}_3\text{-Na}$, реже $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$, $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-Mg-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$. На этапе подземных вод большая часть элементов характеризуется слабой миграционной способностью и подвижностью, поскольку в большом количестве они начинают связываться вторичными фазами.

Озерные воды. Отличаются еще большим разбросом солёности от 1 до 131 г/л, но достаточно узким диапазоном pH от 8,9 до 9,9. Состав при этом очень разнообразен: анионный варьирует - HCO_3 , Cl-SO_4 , $\text{SO}_4\text{-Cl}$, Cl , в катионном преобладает всегда Na. Суммируя два рассчитанных коэффициента миграции можно выделить на этом этапе такие элементы как Cl, S, Na, K, U, Cs, W, V. Они хорошо мигрируют в водах относительно исходных пород и образующихся минералов (глин).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные позволяют проследить совместное проявление процессов: перехода элементов из горных пород в раствор и их удаление из раствора во вторичные фазы. Как видно (табл. 1 и 2), оба коэффициента (водной миграции и геохимической подвижности), несмотря на разный заложенный смысл и исходные формулы, повторяют друг друга по группам интенсивности элементов и имеют достаточно близкие значения для каждого элемента. Стоит оговориться, что при расчётах коэффициента геохимической подвижности разных типов вод был взят усредненный состав глин. Однако, для каждого типа вод характерен свой набор вторичных минералов и это не только глины. При этом в направлении осадки – речные - подземные – озерные воды увеличивается как солёность вод, так и объёмы вторичного минералообразования, и их видовое разнообразие. Как показали предыдущие исследования [1], для подземных вод характерно также рав-

новесие с карбонатами, для озерных – дополнительно с альбитом и цеолитами. В дальнейшем мы попытаемся усложнить расчеты, добавив данные по вторичным минералам, равновесным с каждым типом вод.

Но даже первые расчеты показали, что элементы с активной миграционной способностью находятся на этапе атмосферные осадки – базальты. При этом воды уже равновесны относительно некоторых глинистых минералов, поэтому часть химических элементов (такие как Mn, Fe, Al, Si и др.) сразу связывается во вторичные фазы и хуже мигрирует в водах.

Далее в направлении осадки – речные - подземные – озерные воды интенсивность миграции и подвижности почти всех химических элементов падает. Т.е. уменьшается выщелачивание элементов из пород и увеличивается связываемость их вторичными фазами.

При этом формирующиеся вторичные минеральные и органоминеральные фазы захватывают и часть рассеянных элементов, которые не образуют собственных вторичных минералов, или же сорбируют их на своей поверхности.

Если понаблюдать поведение кальция в природных водах, можно увидеть: сначала он накапливается в атмосферных и речных водах, затем в подземных водах начинает понемногу уходить (достигается равновесие к карбонатам), в озерных – практически не накапливается ($K_x = 0,01$). Что и соответствует реальности.

Интенсивно накапливаются в водах на всем протяжении эволюции (за рассматриваемый период) такие элементы как Cl, Na, S, U, W, т.е. они хорошо выносятся из базальтов и плохо связываются вновь образуемыми минералами. Миграционная способность Cl и Na даже увеличивается на каждом этапе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при первом изучении миграции химических элементов в системе базальты – природные (атмосферные, речные, подземные, озерные) воды – глины мы рассчитали коэффициенты водной миграции K_x , и гео-химической подвижности K_n . На данном этапе особой разницы между ними мы не увидели, необходимы более детальные расчеты в частности вторичного минералообразования.

Уверенно можно пока сказать, что в направлении осадки – речные - подземные – озерные воды интенсивность миграции и подвижности почти всех химических элементов падает. Большинство из них на разных этапах уходят во вторичные отложения. Интенсивно накапливаются в водах на всех этапах Cl, Na, S, U, W, которые пока не достигают равновесия с вторичными минералами.

Таблица 1. Ряды интенсивности выноса химических элементов природными водами из базальтов

Интенсивность миграции	K_x	Атмосферные осадки	Речные воды	Подземные воды	Озерные воды
Очень сильная	>10	B, Cl, U, S, Na, Li	Cl, S	Cl, S, B, Na, U	Cl, B, U, S, Na
Сильная	1-10	W, Cu, K, V, Zn, Sr	Na, Cs, B, Ca , Mg, Li, U	Cs, Li, Mg, Sr	
Средняя	0,1-1	Mg, Ni, Ca , P, Co, Th, Pb, Cs, Er, Tm, Lu, Rb, Yb, Be, Cr, Ho, Sc, Dy, Ba	K, Sr, Zn, Cu, Si, Pb	Ca , K, Zn, Cu, Mn, Pb, Ni	Cs, W, Li, K, V, Cu
Слабая	<0,1	Ce, Y, Zr, Gd, Hf, Tb, Pr, Sm, Nd, Eu, La, Mn, Ta, Si, Ga, Fe, Al, Nb, Ti	Cr, W, Ni, P, Sc, Rb, Ba, Mn, V, Ta, Fe, Co, Th, Be, Ho, Sm, La, Gd, Nd, Y, Pr, Tb, Tm, Er, Dy, Ce, Eu, Ga, Al, Zr, Ti, Nb	Cr, Rb, Be, Ba, Si, Sc, P, W, Fe, Zr, Co, V, Lu, Hf, Tm, Th, Y, Yb, Ho, Ta, Er, Tb, Eu, Dy, Sm, Gd, La, Pr, Ce, Nd, Ga, Al, Nb, Ti	Pb, Be, Ni, Mn, Zn, P, Mg, Sr, Cr, Co, Fe, Tb, Pr, La, Gd, Zr, Dy, Sm, Ce, Al, Th, Nd, Ho, Er, Y, Tm, Yb, Rb, Lu, Eu, Ga, Ca , Ba, Hf, Ta, Sc, Si, Ti, Nb

Таблица 2. Ряды подвижности химических элементов в природных водах*

Интенсивность подвижности	K_x	Атмосферные осадки	Речные воды	Подземные воды	Озерные воды
Очень сильная	>10	W, Cl, U, Na	Cl	Cl, Na, S	Cl, Na, U, S
Сильная	1-10	S, V, Zn, Sr, P, Li, K, Cu, Mg, Ni	Na, S, Mg, Ca , Cs, W	U, Mg, Sr, Ca	W
Средняя	0,1-1	Co, Ca , Er, Tm, Lu, Ho, Yb, Dy, Zr, Hf, Sc, Cr, Ba, Ce, Gd, Tb, Y, Th, Eu, Sm, Pb, Nd, Pr	K, Sr, Zn, U, P, Li, Cu, Si, Ni, Cr	Cs, Li, W, Zn, K, P, Mn, Ni, Cr	V, K, P, Cs, Ni
Слабая	<0,1	Ta, Be, La, Rb, Cs, Mn, Fe, Nb, Al, Ga, Si, Ti	Sc, Pb, Ba, Ta, V, Mn, Fe, Rb, Co, Sm, Ho, Gd, Tb, Nd, Tm, La, Pr, Dy, Er, Y, Eu, Ce, Be, Th, Ga, Al, Zr, Ti, Nb	Cu, Zn, Ba, Sc, Pb, Fe, Co, Si, Be, Rb, V, Hf, Lu, Ta, Tm, Ho, Er, Eu, Yb, Tb, Y, Dy, Sm, Gd, Pr, Nd, La, Ce, Al, Th, Nb, Ga, Ti	Li, Zn, Sr, Zr, Mn, Cu, Fe, Tb, Mg, Co, Gd, Be, Sm, Dy, Pr, Al, Nd, Ho, Eu, Er, La, Cr, Ce, Pb, Tm, Lu, Y, Yb, Hf, Ta, Ba, Ga, Ca , Sc, Th, Rb, Si, Ti, Nb

*не рассмотрен В, который не был определен в глинах.

Авторы благодарят С.В. Борзенко за организацию полевых работ. Работа выполнена при поддержке грантов РНФ 20-77-10084, РФФИ 20-05-00127 и 18-05-00104.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борзенко С.В., Дребот В.В., Федоров И.А., Шварцев С.Л. Содовые воды района Торейских озер Забайкальского края: химический состав подземных и озерных вод // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы III Всероссийской научной конференции с межд. участием. - Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2018. - С. 434-437
2. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих

верхнюю часть континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. - 301 с.

3. Перельман А.И. Геохимия природных вод. – М.: Наука, 1982. – 152с.
4. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
5. Шварцев С.Л., Рыженко Б.Н., Алексеев В.А., Дутова Е.М., Кондратьева И.А., Лепокурова О.Е. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода. Т.2. Система «вода-порода» в условиях зоны гипергенеза. – Новосибирск: СО РАН, 2007. – 389 с.
6. Чертко Н.К. Основы геохимии. – Минск: БГУ, 2010. – 134 с.