Южно-Байкальский $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -трассер в подземных водах активных разломов Иркутского Предбайкалья

Рассказов С.В., Чувашова И.С., Борняков С.А.

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, rassk@crust.irk.ru
Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*

Чебыкин Е.П.

*Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия
Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия*

Ильясова А.М., Оргильянов А.И., Бадминов П.С., Крюкова И.Г., Семинский А.К., Попов Е.П.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Коваленко С.Н.

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

АННОТАЦИЯ: Идентифицируется компонент резервуара глубинной воды Южного Байкала в подземных водах Иркутского Предбайкалья с использованием отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ и концентраций U. Предполагается, что латеральному продвижению глубинной байкальской воды способствует развитие пологих (ослабленных при рифтогенезе) разрывов Ангарского надвига и субвертикальных разрывов сдвиговой шовной зоны Главного Саянского разлома.

South Baikal $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ tracer in groundwaters of active faults in Irkutsk Prebaikalia

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A.

*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia, rassk@crust.irk.ru
Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

Chebykin E.P.

*Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia
Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

Plyasova A.M., Orgilyanov A.I., Badminov P.S., Kryukova I.G., Seminsky A.K., Popov E.P.

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Kovalenko S.N.

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

ABSTRACT: A component of the deep Baikal water reservoir is identified in groundwaters of Irkutsk Prebaikalia in terms of variations of the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio and U abundances. It is suggested that lateral move of the deep Baikal water is facilitated by the development of gentle ruptures (weakened by rifting) of the Angara thrust fault and subvertical ones of the Main Sayan shear zone.

ВВЕДЕНИЕ

Изотопные трассеры эффективно используются для идентификации источников магматических расплавов, излившихся в океанах из глубоких частей мантии. В единой системе изотопных меток глубинных резервуаров рассматриваются вулканические породы различного состава. Изотопная систематика приобретает основной смысл благодаря наличию общего первородного компонента Земли, участвующего в смешении. В глобальном масштабе такой компонент проявляется в трендах фигуративных точек на диаграммах разных изотопных отношений (Nd, Sr, Pb, Os), сходящихся к одному составу FOZO

(Focal Zone), и в сходящихся трендах изотопных отношений Pb к составу C (Common). Общий компонент служит в качестве исходной точки главного однородного мантийного резервуара Земли, относительно которого оценивается вклад других резервуаров, образовавшихся в ходе ее эволюции [4,5]. Подобные изотопные исследования магматических расплавов континентов не дают единой компонентной систематики, но по сходящимся трендам изотопных отношений определяются общие компоненты однородной конвектирующей мантии, имеющие значение региональных резервуаров с перечником 500–800 км [2].

Опыт изотопной систематики магм используется в настоящей работе для изучения происхождения подземных вод в Иркутском Предбайкалье. Чтобы представить соотношения их компонентов должен быть выбран однородный резервуар и определен изотопный трассер, отражающий состав этого резервуара. В качестве однородного эталона сравнения рассматривается компонент Южно-Байкальского резервуара (ЮБР), представляющего собой огромный объем воды, образовавшийся вследствие позднеплиоценового-плейстоценового некомпенсированного осадками погружения днища Южно-Байкальской рифтовой впадины. Подземные воды поступают в оз. Байкал с окружающих территорий до глубины 250 м. На больших глубинах подземный сток в озеро предотвращается гидростатическим давлением [1]. Глубинная вода озера может проникать под прибрежные территории. Для ее изотопного трассирования используется отношение активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ($OA4/8$) и концентрация урана [U].

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследований – трещинные подземные воды активных разломов южной деформированной части Сибирского палеоконтинента и аккрецированного к нему Хамардабанского террейна. Центральное положение на территории занимает полоса архейских и неопротерозойских метаморфических и магматических пород Шарыжалгайского выступа кристаллического фундамента, протягивающаяся в направлении на запад-северо-запад, и параллельная этому поднятию полоса пород осадочного чехла неопротерозоя, нижнего кембрия, юры и плиоцена-квартера в Прииркутской впадине Сибирской платформы. Породы фундамента надвинуты на породы осадочного чехла по Ангарскому надвику.

Иркутское Предбайкалье относится к 8–9-балльной сейсмической зоне. Параметр $OA4/8$ в подземных водах меняется в зависимости от активности разломов. Наряду с деформационным эффектом, в подземных водах проявлен эффект возрастания $OA4/8$ вследствие химического взаимодействия подземных вод с эвапоритами осадочного чехла Сибирской платформы.

Методика элементного анализа и измерений $OA4/8$ в природных водах приведена в работе [3]. В работу вовлечено более 1000 проб, отобранных из родников и скважин в 2012–2020-х гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы воды, отобранные в трех точках Южного Байкала с глубин от первых м до 1000 м, да-

ли преимущественные интервалы $OA4/8 = 1.95–1.99$ и $[U] = 0.44–0.46$ мкг/дм³ (с повышением в отдельных пробах [U] до 0.53 мкг/дм³). Для этих же проб определены значения изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = \sim 0.70863$ (частично в расширенном диапазоне 0.70850–0.70885) и концентраций стронция $[Sr] = 98–100$ мкг/дм³. U–Sr-изотопная систематика, с одной стороны, дает эталон однородного глубинного резервуара Южного Байкала, с другой стороны, служит чувствительным индикатором загрязнения поверхностных и прибрежных вод озера, которая выражается в расширении диапазонов концентраций и изотопных отношений U и Sr относительно значений однородного глубинного ЮБР.

По полученным данным (табл. 1) обозначаются латеральные и вертикальные гидроизотопные зоны с химическим и деформационным эффектами. Первый эффект выражен в существенном возрастании $OA4/8$ минерализованных подземных вод из эвапоритовых толщ осадочного чехла Сибирской платформы в трех латеральных зонах: Олхинской (неопротерозойско-нижнекембрийские отложения, $OA4/8 = 3.58–15.92$), Худяковской (кембрийские отложения, перекрытые юрскими отложениями, $OA4/8 = 4.28–9.37$) и Голоустенской (неопротерозойские отложения, $OA4/8 = 2.73–4.09$). Второй эффект проявлен в умеренном возрастании $OA4/8$ пресных вод из активных разломов, рассекающих породы пяти зон: Ангарской и Радищево (юрские и плиоцен-четвертичные отложения, $OA4/8 = 2.07–2.50$ и $1.99–2.21$, соответственно), Большекотовской и Огоньковской (метаморфические и магматические породы раннего докембрия, $OA4/8 = 1.67–2.48$ и $1.53–2.74$, соответственно) и Шовной (милониты между фундаментом Сибирского палеоконтинента и Хамардабанским террейном, $OA4/8 = 1.06–3.29$). Слабое нарушение циклического равновесия изотопов урана подземных вод определено в тектонически-неактивных структурах раннего докембрия Шарыжалгайского блока (зоны Ангасольская, $OA4/8 = 1.35–1.51$ и Листвянская, $OA4/8 = 1.06–1.98$), в юрских отложениях Академической зоны ($OA4/8 = 1.38–1.73$) и в метаморфических породах Хамардабанского аккрецированного террейна ($OA4/8 = 1.23–1.45$). В Листвянской, Большекотовской, Шовной и Ангасольской зонах скважинами вскрыты застойные подземные воды участков окисления с равновесным ураном.

Данные мониторинга свидетельствуют о меняющихся во времени соотношениях компонентов подземных вод. В минеральной воде из

скважины Олхинской зоны проявилось прогрессирующее химическое растворение эвапоритов, в результате которого за период наблюдений 2013–2018 гг. $OA4/8$ возросло от 11.82 до 15.92, а в 2019 г. немного снизилось (до 15.71). Соответственно, содержание Са сначала повысилось от 162 мг/дм³ до 470 мг/дм³, а затем понизилось до 320 мг/дм³. В подземных водах Худяковской зоны в течение 2014 г. менялись пропорции компонентов неопротерозойско-нижнекембрийских эвапоритов, юрских песча-

ников и модифицированных компонентов ЮБР. В Шовной зоне значения $OA4/8$ возрастали с усилением циркуляции подземных вод при открытии трещин и снижались при закрытии с выходом на сейсмоопасное состояние, продолжавшееся в течение нескольких месяцев. В воде ст. 27 концентрации изотопа ²³⁴U снижались, при минимальных значениях которого случилось Голоуспенское землетрясение с магнитудой 4.7.

Таблица 1. Диапазоны $OA4/8$ и [U] в глубинной воде Южного Байкала, в подземных водах Иркутского Предбайкалья и нефтегазоконденсатного месторождения Дулисьма

Зона	Породы	Концентрация U, мкг/дм ³		ОА4/8	
		min	max	min	max
ЮЖНЫЙ БАЙКАЛ, ОДНОРОДНЫЙ РЕЗЕРВУАР					
Умеренное нарушение циклического равновесия изотопов U					
Глубины от первых м до >1000 м	Вода	0.44	0.46	1.95	1.99
ИРКУТСКОЕ ПРЕДБАЙКАЛЬЕ, ЛАТЕРАЛЬНЫЕ ЗОНЫ					
Существенное нарушение циклического равновесия изотопов U					
Олхинская	Неопротерозойско- нижнекембрийские отложения	0.1	1.37	3.58	15.92
Голоустенская	Неопротерозойские отложения	0.018	1.37	2.73	4.09
Худяковская	Нижнекембрийские отложения под слоем юрских песчаников	0.01	1.01	2.20	9.37
Умеренное нарушение циклического равновесия изотопов U					
Радищево	Юрские отложения	0.2	0.87	1.99	2.21
Ангарская	Юрские и плиоцен- четвертичные отложения	3.5	6.9	2.07	2.50
Большекетовская	Нижний докембрий и юрские отложения	0.03	2.5–3.5	1.67	2.48
Огоньковская	Нижний докембрий	0.046	15	1.53	2.74
Шовная	Милониты	0.035	3.8	1.06	3.29
Слабое нарушение циклического равновесия изотопов U					
Ангасольская	Нижний докембрий	0.02	0.28	1.35	1.51
Листвянская	Нижний докембрий	0.25	2.8	1.06	1.98
Большереченская	Юрские отложения	0.012	0.014	1.49	2.02
Академическая	Юрские отложения	0.44	0.86	1.38	1.73
Хамардабанская	Коллизионный метаморфиче- ский террейн	0.25	0.41	1.23	1.45
ДУЛИСЬМА, ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЗОНЫ					
Умеренное и существенное нарушение циклического равновесия изотопов U					
Абс. высота 205 м, скв. 6К-1	Верхоленская свита, средний кембрий	6.6		2.11	
Абс. высота 25... 180 м, скв. 3К-1, 14К-1	Литвинцевская свита, нижний- средний кембрий	0.12	0.44	3.49	4.01
Абс. высота –45... –53 м, скв. 504, 512, 1104	Литвинцевская свита, нижний- средний кембрий	0.09	0.49	5.85	5.88
Абс. высота –45... –103 м, скв. 17К-1, 18К-1	Литвинцевская свита, нижний- средний кембрий	0.11	0.28	7.04	7.22

В Прииркутской впадине Е.В. Пиннекером и др. была охарактеризована вертикальная гидрогеохимическая зональность [1]. Подобная вертикальная зональность выражена в других частях осадочного чехла Сибирской платформы. Вертикальные гидрогеоизотопные зоны определены на газоконденсатном месторождении Дулисьма, в котором зона пресных вод с общей минерализацией 0.6 г/дм³ прослеживается с поверхности (абсолютные отметки 500–600 м) на глубину 300–400 м и ниже сменяется зонами более минерализованных вод и рассолов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Компонентный состав вод обозначенных гидрогеоизотопных зон идентифицирован с использованием диаграмм смешения $O44/8 - 1/U$. Существенная роль воды из резервуара Южного Байкала как основного компонента подземных вод определена в участках распространения пологих разрывов Ангарского надвига (особенно в северо-восточном крыле активного Ангарского разлома), а также в субвертикальных разрывах шовной зоны Главного Саянского разлома с современной сдвиговой компонентой. Для подземных вод из милонитов Главного Саянского разлома смешение компонентов южно-байкальских и подземных вод подтверждено построениями модели смешения на диаграмме $O44/8 - {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В вертикальной и горизонтальной зональности $O44/8$ подземных вод южного деформированного края Сибирского палеоконтинента проявилась связь вариаций этого параметра с минерализацией подземных вод. По трендам смешения на диаграммах $O44/8 - 1/U$ обозначилась определяющая роль воды, распространяющейся от Южного Байкала под его побережье. Предполагается, что латеральному продвижению вод ЮБР способствует развитие пологих (ослабленных при рифтогенезе) разрывов Ангарского надвига и субвертикальных разрывов сдвиговой шовной зоны Главного Саянского разлома.

БЛАГОДАРНОСТИ

Прецизионные измерения $O44/8$ и $[U]$ выполнялись методом ICP–MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500se в центре коллективного пользования «Ультрамикроанализ» (ЛИН СО РАН).

Работа выполнена при финансировании грантом РНФ 18-77-10027.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С., Колдышева Р.Я., Диденко А.А., Шерман С.И. Гидрогеология Прибайкалья. – Москва: изд-во Наука, 1968. – 170 с.
2. Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Фелелов Н.Н., Саранина Е.В. Калиевая и калинаторная вулканические серии в кайнозойе Азии. – Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО». 2012. – 351 с.
3. Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семицкий А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга ${}^{234}\text{U}/{}^{238}\text{U}$ в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. – 2015. – Т. 460, № 4. – С. 464–467.
4. Hauri B.B., Graham D.W. Lead and helium isotope evidence from oceanic basalts for a common deep source of mantle plumes // Science. – 1996. – V. 272. – P. 991–995.
5. Hauri E.H., Whitehead J.A., Hart S.R. Fluid dynamic and geochemical aspects of entrainment in mantle plumes // J. Geophys. Res. – 1994. – V. 99. – P. 24275–24300.