ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО ЭФФЕКТА ПО ОТНОШЕНИЯМ АКТИВНОСТЕЙ $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ НА ПРОФИЛЕ ИРКУТСК–БАЙКАЛ

^{1,2}Рассказов С.В., ^{1,3}Чебыкин Е.П., ¹Ильясова А.М., ^{1,2}Чувашова И.С.,
^{1,3}Воднева Е.Н., ¹Семинский А.К.

¹Институт земной коры СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 128,
rassk@crust.irk.ru

²Иркутский государственный университет, 664003 Иркутск, ул. Ленина, 3

³Лимнологический институт СО РАН, 664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

Исследованы вариации отношений активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в подземных водах на профиле Иркутск–Байкал, пересекающем четвертичные отложения в зоне Ангарского разлома, юрские и рифей-венд-кембрийские отложения осадочного чехла Сибирской платформы, архейский фундамент, шовную зону между фундаментом Сибирской платформы и Слюдянским метаморфическим субтеррейном Хамардабанского террейна и Слюдянский субтеррейн. Деформационная составляющая в отношениях активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ регистрируется при мониторинге подземных вод из Ангарского разлома, минеральных вод из Олхинской скважины в кембрийских отложениях и подземных вод Култукского геодинамического полигона.

Ключевые слова: подземные воды, Байкал, отношение активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, деформации

IDENTIFICATION OF THE DEFORMATIONAL EFFECT BY $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ACTIVITY RATIOS IN GROUNDWATER FROM THE IRKUTSK–BAIKAL PROFILE

^{1,2}Rasskazov S.V., ^{1,3}Chebykin E.P., ¹Ilyasova A.M., ^{1,2}Chuvashova I.S.,
^{1,3}Vodneva E.N., ¹Seminsky A.K.

¹*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, 664033 Irkutsk Lermontov str., 128, e-mail: rassk@crust.irk.ru*

²*Irkutsk State University, 664033 Irkutsk, Lenin str., 3*

³*Limnological Institute, 664033 Irkutsk, Ulan-Bator str., 3*

Variations of activity ratios $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ in groundwater along the Irkutsk–Baikal hydro-isotopic profile that crosses the Quaternary sediments of the Angara fault zone, Jurassic and Vendian-Cambrian sedimentary cover of the Siberian platform, Archean basement of the platform, suture zone between the platform basement and Slyudyanka metamorphic sub-terrane of the Khamar-Daban terrane, and the Slyudyanka sub-terrane has been studied. The deformational components in terms of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratios are registered in the monitoring stations of groundwater from the Angara fault, mineral water Olkha drill hole in the Cambrian sediments, and groundwater of the Kultuk geodynamical polygon.

Keywords: groundwater, Baikal, activity ratio $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, deformation

Циклическое равновесие отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} - (^{234}\text{U}/^{238}\text{U}) \approx \gamma \approx 1$ – соответствует атомному отношению $\approx 5,47 \times 10^{-5}$. Нарушение равновесия изотопов U связано с эффектами Сзиланда–Чалмерса и Чалова–Чердынцева. Первый эффект обусловлен аномальным химизмом среды, второй – деформациями горных пород. К примеру, эффект Сзиланда–Чалмерса проявлен в аномально высоких значениях $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$, связанных с составом геологических объектов. Например, в окаменелостях раковин и костях значения этого параметра достигают 243,8, в горячих источниках Татсунокучи (Tatsunokuchi), Япония на-

ходятся в интервале 2,7–51 и в холодной воде на острове Сааремаа (Эстония) составляют 54 [Tokarev et al., 2006]. Деформационный отклик на крупное сейсмическое событие регистрировался 10-кратным возрастанием ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) в подземных водах Грузии [Зверев и др., 1975]. Другой деформационный отклик проявился в процессе подготовки сейсмического события в горячих водах источника города Ниланд, США. В течение года фиксировалось понижение концентраций U от 0,013 до 0,0055 мкг/л и возрастание ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) от 2,6 до 4,5. Через 11 дней после начального толчка концентраций U были превышены шестикратно (до 0,044 мкг/л) и ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) трехкратно (до 1,5) [Finkel, 1981].

Химические и деформационные эффекты могут проявиться в вариациях ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) одновременно. Идентификация эффектов требует проведения наблюдений пространственных и временных вариаций этого параметра и концентраций U в подземных водах территорий. В настоящей работе мы приводим результаты систематического изучения изотопного состава U в подземных водах по профилю Иркутск–Байкал и идентифицируем участки проявления деформационных эффектов. Методика определений ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) приведена в работе [Чебыкин и др., 2015].

Геологический фон, смена состава U вдоль гидроизотопного профиля

Гидроизотопный профиль протягивается в субмеридиональном направлении на 110 км. Северную часть профиля составляют породы осадочного чехла Сибирской платформы – плиоцен-четвертичные и юрские осадочные отложения в районе города Иркутск, рифей-венд-кембрийские отложения участков Олха, Большой Луг, Шаманка и Худяково. Центральной части профиля соответствует полоса пород Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы Олхинского плато и района пос. Листвянка. Южная часть профиля представлена породами шовной зоны, отделяющей фундамент платформы от Слюдянского метаморфического субтеррейна Хамардабанского террейна в районе пос. Култук, и породами Слюдянского метаморфического субтеррейна в районе города

Слюдянка (Рис. 1). На участках профиля существенно меняются и концентрации U, и отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ подземных вод (табл. 1).

Рис. 1. Схема распределения станций опробования на гидроизотопном профиле Иркутск–Байкал

Условным обозначениям разновозрастных пород соответствуют обозначения мест опробования подземных вод (треугольники цвета стратиграфического подразделения): из четвертичных отложений - Ангарский разлом (Af); из юрских отложений – Хомутово (Hom), Радищево (Rad), Академгородок и другие районы левобережья р. Ангара (Ak); из отложений рифея, венда и кембрия – Худяково (Hud), Олха (Ol), Большой Луг (Bl), Шаманский мыс (Shm); из фундамента платформы – Тещин Язык (Tyaz), Огоньки (Og), Трудный (Trud), Земляничный (Zm), Листвянка (Lis); из шовной зоны между фундаментом Сибирской платформы и Слюдянским метаморфическим субтеррейном – Култук (Kult); из Слюдянского субтеррейна – Слюдянка (Slud), Талая (Tal).

В водах из юрских терригенных отложений с пластами углей на правобережье и левобережье р. Ангара концентрации U находятся в одном диапазоне (0,2–0,86 мкг/л) при более высоком ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на правобережье (1,99–2,21), чем на левобережье (1,38–1,73). В родниковых водах из Ангарского разлома, рассекающего юрские и дренирующего четвертичные преимущественно галечниковые отложения, повышаются и концентрации U (до интервала 2,8–6,9 мкг/л) и отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (до 2,07–2,50).

Диапазоны ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и концентраций U на участках профиля Иркутск–Байкал

Участок	Породы	Концентрация U, мкг/л		$(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$	
		min	max	min	max
Правобережье р. Ангара	Юрские отложения	0,2 [0,0063]	0,83	1,99	2,21
Ангарский разлом	Четвертичные отложения	2,8	6,9	2,07	2,50
Левобережье р. Ангара	Юрские отложения	0,44	0,86	1,38	1,73
Олха, Худяково	Рифей-венд-кембрийские отложения	0,01	1,37	2,20	14,95
Олхинское плато	Архейский фундамент	0,046	15	1,53	2,44
Листвянка	Архейский фундамент	0,25	2,8	1,06	1,98
Култук	Шовная зона	0,0087	3,8	1,09	3,29
Слюдянка	Метаморфический субгерейн	0,25	0,41	1,23	1,45

В участках рифей-венд-кембрийских отложений, включающих конгломераты, песчаники, алевролиты, доломиты и известняки с гипсом, ангидритом и пластами каменной соли общий диапазон ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) в подземных водах составил 2,20–14,95, диапазон концентраций U – 0,01–1,37 мкг/л. На Шарыжалгайском выступе фундамента Сибирской платформы, сложенном гнейсами, амфиболитами и гранитами, выявлены существенные отличия изотопной систематики урана в водах западной части территории (Олхинское плато) и в восточной (пос. Листвянка). Для подземных вод из пород фундамента на Олхинском плато получен интервал ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) от 1,53 до 2,44 и интервал концентраций U от 0,046 до 15 мкг/л, для подземных вод пос. Листвянка – интервал ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) от 1,06 до 1,98 и интервал концентраций U от 0,25 до 2,8 мкг/л. В водах разных станций Култукского полигона, дренирующих милониты шовной зоны, интервалы concentra-

ций U составили от 0,0087 до 3,8 мкг/л и величин ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) от 1,09 до 3,29. В водах Слюдянского метаморфического террейна диапазоны концентраций U и ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) были ограничены, соответственно, интервалами 0,41–0,25 мкг/л и 1,23–1,45.

Деформационный отклик изотопного состава урана

В ряду наблюдений родника ст. 50 левобережья р. Ангара 06.12.2012–14.01.2014 концентрации U снижались от 0,59 до 0,44 мкг/л. Диапазон ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) на этой станции опробования составил интервал 1,36–1,41. Серия родников р-нов Университетский и Первомайский г. Иркутска на диаграмме ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) – $1/U$ дала общий линейный тренд от точки ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) = 1,53, $1/U$ = 0,17 до точки ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) = 1,73, $1/U$ = 8,33. Субпараллельно вытянут тренд вод родника ст. 50 при пониженных отношениях ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$). Эти тренды определяются главным образом вариациями ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и отличаются от групп точек родников из Ангарского разлома (ст. 3с-24 и 23), для которых свойственны заметные вариации обратных концентраций U, согласующиеся со слабыми вариациями ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) (Рис. 2).

Рис. 2. Соотношения ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) – $1/U$ в водах родников из Ангарского разлома и стабильного блока с юрскими отложениями на левобережье р. Ангара

Воды из отложений осадочного чехла рифей-венд-кембрийского возраста опробовались в районах пос. Худяково, Олха, Большой Луг и мыса Шаманка. Существенное повышение ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) в водах этих территорий служит признаком проявления химического эффекта растворения в подземных водах минеральных компонентов пород. В районе пос. Олха, Большой Луг и мыса Шаманка рифей-венд-кембрийские отложения расчленены на 50–150 м. Мониторинг Олхинской скважины минеральной воды “Иркутская” (глубина 350 м) (ст. 56) показал возрастание ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) от 11,82 до 14,95 в период с 20.06.2013 до 25.02.2015 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и снижение до 14,37 в пробе, отобранной 25.04.2015. Концентрации U последовательно снизились от 0,55 до 0,38 мкг/л. Плавный ход изменений концентраций и изотопного состава U нарушался 22.03.2013 и 18.05.2014, возможно, из-за наложения деформационного эффекта на общий химический контроль вхождения урана в минеральные воды Олхинской скважины (Рис. 3).

Изотопный состав урана подземных вод из шовной зоны района пос. Култук был предметом специальных исследований для определения критериев среднесрочного прогноза сейсмических событий в Южно-Байкальской впадине. Сейсмопрогностический деформационный мониторинг ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) проводился в 2012–2014 гг. на Култукском полигоне западного побережья оз. Байкал. Выявлены отклики вариаций изотопного состава урана на сейсмические события в Южно-Байкальской впадине [Чебыкин и др., 2015].

Рис. 3. Временные вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) (а), концентраций U (б) и соотношения ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) – $1/\text{U}$ (в) в минеральных водах из Олхинской скважины. Отклонение от тренда химического растворения во временном интервале 22.03.2014–18.05.2014 может быть связано с наложением деформационного эффекта.

Распределение точек станций наблюдений в координатах ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) – $1/\text{U}$ интерпретируется в связи с проявлением деформационного эффекта Чалова–Чердынцева, усложненного разбавлением подземных вод из деформационной зоны водами метеорного происхождения. Состав U , близкий к циклическому равновесию, т.е. $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U}) \approx 1$ с повышенным содержанием $\text{U} \sim 3$ мкг/л ($1/\text{U} = \sim 0,33$), характеризует зону окисления, не затронутую деформациями. Возрастание $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$ отражало деформации. Разбавление выразилось в образовании двух протяженных трендов, слегка наклоненных относительно оси абсцисс (Рис. 4).

В результате деформационного воздействия на породы зоны окисления (ст. 45) образовался источник вод ст. 8 (Чертова Гора), занимающей относительно высокое положение в рельефе. На низких уровнях (ст. 29 в долине р. Медлянка и др. станциях) происходило разубоживание концентраций урана этого источника с образованием тренда I. Уровень разубоженных вод тренда I служил в качестве исходного для проявления наложенного деформационного эффекта с относительным возрастанием $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$ в водах ст. 40, 9 и 66А. Только воды последней из трех станций опробования (родник остановочного пункта Партизанский) обнаружили разубоживание метеорными водами. Воды двух других станций, представляющих собой скважины глубиной 60–120 м, не сопровождалась разубоженными составами. Наконец, особо выделяется состав ст. 27 (скважина школы № 7) с максимальными значениями $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$, возможно, производными от значения отношения активностей урана ст. 65 (дренирующая штольня железнодорожного туннеля Партизанский). Подобно водам ст. 40 и 9, воды ст. 27 не имеют разбавленных составов. активностей урана ст. 65 (дренирующая штольня железнодорожного туннеля Партизанский). Подобно водам ст. 40 и 9, воды ст. 27 не имеют разбавленных составов.

Рис. 4. Соотношения $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U}) - 1/U$ в подземных водах из пород шовной зоны между фундаментом Сибирской платформы и Слюдянским субтеррейном

Вертикальными стрелками выделены 3 типа деформационного отклика $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$ в водах из скважин: ст. 45 → ст. 8 – начальный (наиболее низкий) уровень деформаций зоны окисления, ст. 8 → ст. 40, 9 и 66А – превышение $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$ относительно уровня деформаций ст. 8, ст. 65 → ст. 27 – наиболее значительное возрастание $(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})$, возможно, не связанное с начальным уровнем деформаций ст. 8. Тренд I обозначает разбавление вод начального (наиболее низкого) уровня деформаций зоны окисления (ст. 8), тренд II – разбавление родниковой воды остановочного пункта Партизанский (ст. 66А).

Заключение

Гидроизотопный профиль Иркутск–Байкал пересекает четвертичные отложения в зоне Ангарского разлома, юрские и рифей-венд-кембрийские отложения осадочного чехла Сибирской платформы, архейский фундамент, шовную зону между фундаментом Сибирской платформы и Слюдянским метаморфическим субтеррейном Хамардабанского террейна и Слюдянский субтеррейн. Отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в подземных водах меняются в зависимости от вмещающих пород. Результаты, полученные для подземных вод из юрских от-

ложений осадочного чехла, из архейских пород фундамента Сибирской платформы и из пород Слюдянского метаморфического субтеррейна, рассматриваются как показатель фонового взаимодействия вода–порода в стабильных блоках коры (диаграммы не показаны).

Для регистрации деформационной составляющей в гидроизотопном мониторинге на рассматриваемом профиле представляют интерес три объекта:

1. Возрастание концентраций U и ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) в родниковых водах станций Ангарского разлома, по отношению к подземным водам из сопредельных территорий юрских отложений, отражает повышенные деформации, связанные с его текущей активностью в районе Иркутска.

2. Отчетливые плавные длиннопериодные вариации концентраций U и ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) в минеральных водах из Олхинской скважины обусловлены эффектом химического растворения минеральных компонентов из кембрийских отложений усольской свиты. Деформационный эффект может регистрироваться в осложнениях временного вариационного тренда урановых параметров.

3. Возрастание ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) в подземных водах из шовной зоны между фундаментом Сибирской платформы и Слюдянским субтеррейном (на Култукском геодинамическом полигоне) характеризует деформационный эффект, а снижение концентраций U – разбавление подземных вод метеорными водами. Тренд смещения определяется резервуаром вод начального (сравнительно низкого) уровня деформаций зоны окисления. По повышенным значениям ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) в подземных водах из локальных резервуаров подземных трещинных вод регистрируются деформации, превышающие начальный уровень деформационного эффекта.

Список литературы

1. Зверев В.Л., Долидзе Н.И., Спиридонов А.И. и др. Аномалия четных изотопов урана в подземных водах сейсмоактивных районах Грузии // Геохимия. – 1975. – № 11. – С. 1720–1724.
2. Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский 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.
3. Finkel R.C. Uranium concentrations and $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratios in fault-associated groundwater as possible earthquake precursors // Geophysical Research Letters. – 1981. – V. 8, N 5. – P. 453–456.
4. Tokarev I., Zubkov A.A., Rumynin V.G., Polyakov V.A., Kuznetsov V.Yu., Maksimov F.E. Origin of high $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratio in post-permafrost aquifers // Uranium in the Environment: Mining impact and consequences. / B.J. Merkel, A. Hasche-Berger (eds.). Springer, 2006. P. 847–856.