

HYDROGEOCHEMICAL ZONING OF URANIUM ISOTOPES ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) IN THE SOUTHERN SIBERIAN PALEOCONTINENT: THE ROLE OF THE SOUTH BAIKAL RESERVOIR IN THE GROUNDWATER FORMATION

S.V. Rasskazov ^{1,2✉}, A.M. Ilyasova¹, I.S. Chuvashova ^{1,2}, S.A. Bornyakov ^{1,2}, A.I. Orgilyanov¹,
S.N. Kovalenko², A.K. Seminsky¹, E.P. Popov¹, E.P. Chebykin ^{1,3}

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

² Irkutsk State University, 3 Lenin St, Irkutsk 664025, Russia

³ Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Ulan-Batorskaya St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. The southern deformed edge of the Siberian paleocontinent is studied for zoning the disturbance of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ cyclic equilibrium in groundwaters discharged to the accreted Khamardaban terrane. A relationship is established between vertical variations of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (OA4/8) activity ratios and the hydrogeochemical zoning of groundwaters. Lateral OA4/8 zoning of groundwaters in the basement rocks and sedimentary cover of the Siberian platform is described. It is emphasized that an important role is played by the water propagating from the South Baikal reservoir (SBR) (OA4/8 = 1.95–1.99; U content = 0.44–0.46 $\mu\text{g}/\text{L}$) under the shore of Lake Baikal. It is suggested that the lateral advancement of the SBR water is facilitated by the development of low-angle (weakened by rifting) fractures of the Angara thrust fault, as well as sub-vertical fractures in the shear zone of the Main Sayan Fault. Monitoring data on the study area show that the ratios of the groundwaters components vary in time due to Cherdyntsev – Chalov deformational effect, chemical interaction of the waters and evaporites, and mixing of the groundwaters with contrasting hydrogeochemical signatures.

KEYWORDS: groundwater; Baikal; $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$; uranium; active fault; evaporate

FUNDING: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the grant for implementation of large scientific projects on priority areas of scientific and technological development (project 13.1902.21.0033 – Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory).

The article is published under the state assignment for the project of the Institute of the Earth's Crust SB RAS (№ 0346-2019-0005).

RESEARCH ARTICLE

Received: February 11, 2020

Revised: June 25, 2020

Accepted: July 14, 2020

Correspondence: Sergei V. Rasskazov, rassk@crust.irk.ru

FOR CITATION: Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P., 2020. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (3), 632–650. doi:10.5800/GT-2020-11-3-0496

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ИЗОТОПОВ УРАНА ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) НА ЮГЕ СИБИРСКОГО ПАЛЕОКОНТИНЕНТА: РОЛЬ РЕЗЕРВУАРА ЮЖНОГО БАЙКАЛА В ФОРМИРОВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

С.В. Рассказов^{1,2}, А.М. Ильясова¹, И.С. Чувашова^{1,2}, С.А. Борняков^{1,2}, А.И. Оргильянов¹,
С.Н. Коваленко², А.К. Семинский¹, Е.П. Попов¹, Е.П. Чебыкин^{1,3}

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² Иркутский государственный университет, 664025, Иркутск, ул. Ленина, 3, Россия

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

АННОТАЦИЯ. Исследуется зональность в нарушении циклического равновесия $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в подземных водах на южном деформированном краю Сибирского палеоконтинента с выходом в аккретированный Хамардабанский террейн. Обозначается связь вертикальных вариаций отношений активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (ОА4/8) с гидрогеохимической зональностью подземных вод. Характеризуется латеральная зональность ОА4/8 подземных вод в породах фундамента и отложениях осадочного чехла Сибирской платформы. Подчеркивается определяющая роль воды, распространяющейся от Южно-Байкальского резервуара (ЮБР) с характерными значениями ОА4/8 = 1.95–1.99 и концентрацией U = 0.44–0.46 мкг/дм³ под побережье Байкала.

Предполагается, что латеральному продвижению вод ЮБР способствует развитие пологих (ослабленных при рифтогенезе) разрывов Ангарского надвига и субвертикальных разрывов сдвиговой шовной зоны Главного Саянского разлома. Данные мониторинга свидетельствуют о меняющихся во времени соотношениях компонентов подземных вод, обусловленных деформационным эффектом Чердынцева – Чалова, химическим взаимодействием воды с эвапоритами и смешением подземных вод с контрастными U-изотопными характеристиками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подземные воды; Байкал; $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$; уран; активный разлом; эвапорит

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, грантом на реализацию крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (проект № 13.1902.21.0033 – Основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды на Байкальской природной территории).

Статья подготовлена в рамках госзадания по проекту ИЗК СО РАН № 0346-2019-0005.

1. ВВЕДЕНИЕ

Циклическое равновесие отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ – ОА4/8 ≈ 1 – соответствует атомному отношению $\approx 5.47 \times 10^{-5}$. Нарушение равновесия в природе нередко приводит к значениям ОА4/8 геологических объектов в десятки и сотни единиц [Tokarev et al., 2006]. Отношения не остаются постоянными и варьируются во времени и в пространстве. Например, в горячих источниках Японии Татсунокучи (Tatsunokuchi) определен интервал варьирующихся во времени значений ОА4/8 от 2.7 до 51 [Yamamoto et al., 2003].

Циклическое равновесие может быть нарушено по разным причинам. Один из эффектов, вызванный деформацией пород в активном разломе и, как следствие, реализовавшийся в избыточной отдаче ^{234}U в воду, циркулирующую через горные породы и минералы, был продемонстрирован В.В. Чердынцевым и П.И. Чаловым [Cherdyntsev, 1969, 1973; Chalov, 1975]. Эффект Чердынцева – Чалова неоднократно регистрировался в откликах ОА4/8 подземных вод на сейсмические события. К примеру, было отмечено 10-кратное косейсмическое возрастание ОА4/8 в подземных водах Грузии [Zverev et al., 1975]. Более длительные наблюдения выявили изменения ОА4/8, предшествовавшие сейсмическому

событию в горячих водах источника города Ниланд, США [Finkel, 1981]. ОА4/8 возросло от 2.6 до 4.5 в течение года с понижением концентрации урана ([U]) от 0.0130 до 0.0055 мкг/дм³. Через 11 дней после сильного толчка ОА4/8 понизилось трехкратно (до 1.5) при шестикратном повышении [U] (до 0.044 мкг/дм³).

Повышенные значения ОА4/8 (интервал 2–4) были определены в подземных водах участков сейсмогенных деформаций коры в активных разломах Тункинской долины Байкальской рифтовой зоны. В результате 5-летнего мониторинга ОА4/8 на сеймопрогностических полигонах западного и восточного структурных окончаний этой долины был обнаружен разный характер откликов ОА4/8 на подготовку и реализацию землетрясений. На западном окончании долины значения ОА4/8 ступенчато снижались вследствие закрытия трещин, препятствовавшего циркуляции глубинных вод при подготовке и реализации сильного землетрясения под Северным Хубсугулом. На восточном окончании значения ОА4/8 снижались (вследствие закрытия трещин) с переходом к резкому возрастанию и малоамплитудным вариациям (их открытием и циркуляцией глубинных вод) при подготовке и реализации сильного землетрясения под Южным Байкалом [Rasskazov et al., 2018].

В настоящей работе исследуются вариации $OA4/8$ и $[U]$ в подземных водах юга Сибирского палеоконтинента с выходом в аккрегированный Хамардабанский террейн. С одной стороны, Иркутское Предбайкалье относится к 8–9-балльной сейсмической зоне [Ulomov, Bogdanov, 2016]. С другой стороны, в подземных водах осадочного чехла платформы определены высокие значения $OA4/8$ (до 15.9), обусловленные химическим взаимодействием подземных вод с эвапоритами. Этот фактор может сочетаться с откликами $OA4/8$ на деформационное состояние трещин и осложняться гидродинамическими процессами.

Территория исследований ограничена с юга однородным Южно-Байкальским резервуаром (ЮБР), глубинная вода которого характеризуется значениями $OA4/8 = 1.95–1.99$ и $[U] = 0.44–0.46$ мкг/дм³ [Rasskazov et al., 2015a]. В тектонических структурах Иркутского Предбайкалья родники и скважины глубиной до 120 м (реже до 350 м) обозначают зоны подземных вод с разной степенью нарушения циклического равновесия изотопов U. Подземные воды поступают в оз. Байкал с окружающих территорий до глубины 250 м. На больших глубинах подземный сток в озеро предотвращается гидростатическим давлением [Pinneker et al., 1968]. Глубинная вода озера, наоборот, проникает под прибрежные территории. Характерные значения $OA4/8$ и $[U]$ Южно-Байкальского резервуара используются в качестве маркеров подземного водообмена озера с территорией юга Сибирского палеоконтинента.

Учитывая геологическое строение и специфику вертикального гидрогеохимического разреза, мы сначала приводим данные, полученные в зонах с контрастными вариациями $OA4/8$ и $[U]$, и определяем специфику источников вод с существенным и слабым нарушением циклического равновесия U, а затем обращаемся к данным с промежуточным (умеренным) нарушением равновесия. Основная цель исследования – выявить характер пространственно-временного проявления гидрогеохимического и деформационного эффектов избытка ²³⁴U в связи с распространением воды ЮБР в Иркутское Предбайкалье. В работу вовлечено более 1000 проб, отобранных в 2012–2019 гг. Методика элементного анализа вод и измерений $OA4/8$ приведена в работах [Chebykin et al., 2015; Rasskazov et al., 2015b].

2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА

Центральное положение на территории исследования занимает полоса архейских и палеопротерозойских метаморфических и магматических пород Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирской платформы, протягивающаяся в направлении запад-северо-запад, и параллельная этому поднятию полоса пород осадочного чехла Сибирской платформы неопротерозоя, нижнего кембрия, юры и плиоцена – квартера в Прииркутской впадине [Odintsova et al., 1967; Skoblo et al., 2001]. Породы фундамента надвинуты на породы осадочного чехла по Ангарскому надвику [Danilovich, 1949, 1963; Zamaraev et al., 1983]. При горизонтальной амплитуде

смещения первые километры в западной части структуры (р. Иркут) в автохтоне фронта надвига находятся неопротерозойские отложения шаманской свиты основания осадочного чехла. При возрастании амплитуды до 30 км в восточной части (Иркутское водохранилище в истоке р. Ангары) выходы автохтона во фронте надвига представлены юрскими отложениями (рис. 1).

На восток-северо-восточном фланге Прииркутской впадины обнажаются неопротерозойские породы трехчленного байкальского комплекса (голоуспенской, качергатской и улентуйской свит), перекрывающего фундамент [Grudin, Chuvashova, 2011]. Юго-юго-западный фланг Шарыжалгайского поднятия образуют метаморфические породы Слюдянского коллизионного субтеррейна Хамардабанского террейна, аккрегированного к Сибирскому палеоконтиненту в раннем палеозое, около 480 млн лет назад [Salnikova et al., 1998]. Террейн отделяется от фундамента палеоконтинента Восточно-Саянской шовной зоной, протягивающейся от западной оконечности оз. Байкал в направлении запад-северо-запад на 1000 км при ширине выходов милонитов от 1 до 10 км. Современная активность этой зоны проявлена в развитии сдвиговых палеосейсмодислокаций [Chipizubov, Smekalin, 1999].

В современной тектонической структуре территории важнейшую роль играет Обручевский сброс, по которому фрагмент фундамента Сибирской платформы в Южно-Байкальской впадине опустился в кайнозое на несколько километров [Logatchev, Zorin, 1992]. По геофизическим данным, под Южным Байкалом предполагается опускание осадочных толщ не только кайнозоя, но и мезозоя и палеозоя с общей мощностью до 14 км [Suvorov, Mishen'kina, 2005]. Еще один активный разлом (Ангарский) проходит вдоль долины р. Ангары [Semin-sky et al., 2001; Seminsky, Radziminovich, 2007].

3. ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ

Осадочный чехол Сибирской платформы характеризуется соленосным и несоленосным типами вертикальной гидрогеохимической зональности [Alekseeva, Alekseev, 2019]. В Прииркутской впадине различаются зоны соленосного типа разреза [Pinneker et al., 1968] (сверху вниз): (1) пресных гидрокарбонатных магниево-кальциевых вод, (2) пресных гидрокарбонатных натриевых (содовых) вод, (3–4) солоноватых и соленых хлоридных натриевых вод с общей минерализацией (ОМ) соответственно 1–3 и 3–35 г/дм³, (5–6) хлоридных натриевых рассолов с ОМ = 35–50 г/дм³ и более (рис. 2). Мощность верхней гидрогеохимической зоны редко превышает 100 м. Вторая зона пространственно связана с напорным водоносным горизонтом. Ее мощность составляет 70–80 м, местами увеличивается до 130 м и в пос. Ангарские Хутора достигает 500 м. Солоноватые воды третьей зоны проявляются в юрских отложениях верхней (дабатской) части черемховской свиты и сменяются солеными водами четвертой гидрогеохимической зоны, нижняя граница которой захватывает карбонатные породы литвинцевской свиты

нижнего – среднего кембрия. В усольской свите этого возраста находятся мощные залежи солей, с которыми связаны хлоридные натриевые рассолы.

Отношение активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ измерялось в водах родников и малоглубинных скважин Прииркутской впадины. В минеральных водах и рассолах глубоких горизонтов измерений не проводилось. Этот параметр, однако, поддается здесь предварительной оценке благодаря такой же вертикальной гидрогеохимической зональности в других частях осадочного чехла Сибирской

платформы. На газоконденсатном месторождении Дулисьма зона пресных вод с $\text{OM} = 0.6 \text{ г/дм}^3$ прослеживается с поверхности (абсолютные отметки 500–600 м) на глубину 300–400 м и ниже сменяется более минерализованными водами и рассолами (табл. 1, рис. 2).

В отличие от зон пресных вод в юрских отложениях разреза Прииркутской впадины, зона пресных вод в разрезе Дулисьма находится в красноцветных отложениях верхоленской свиты среднего кембрия. Другая особенность этого разреза – расположение зоны

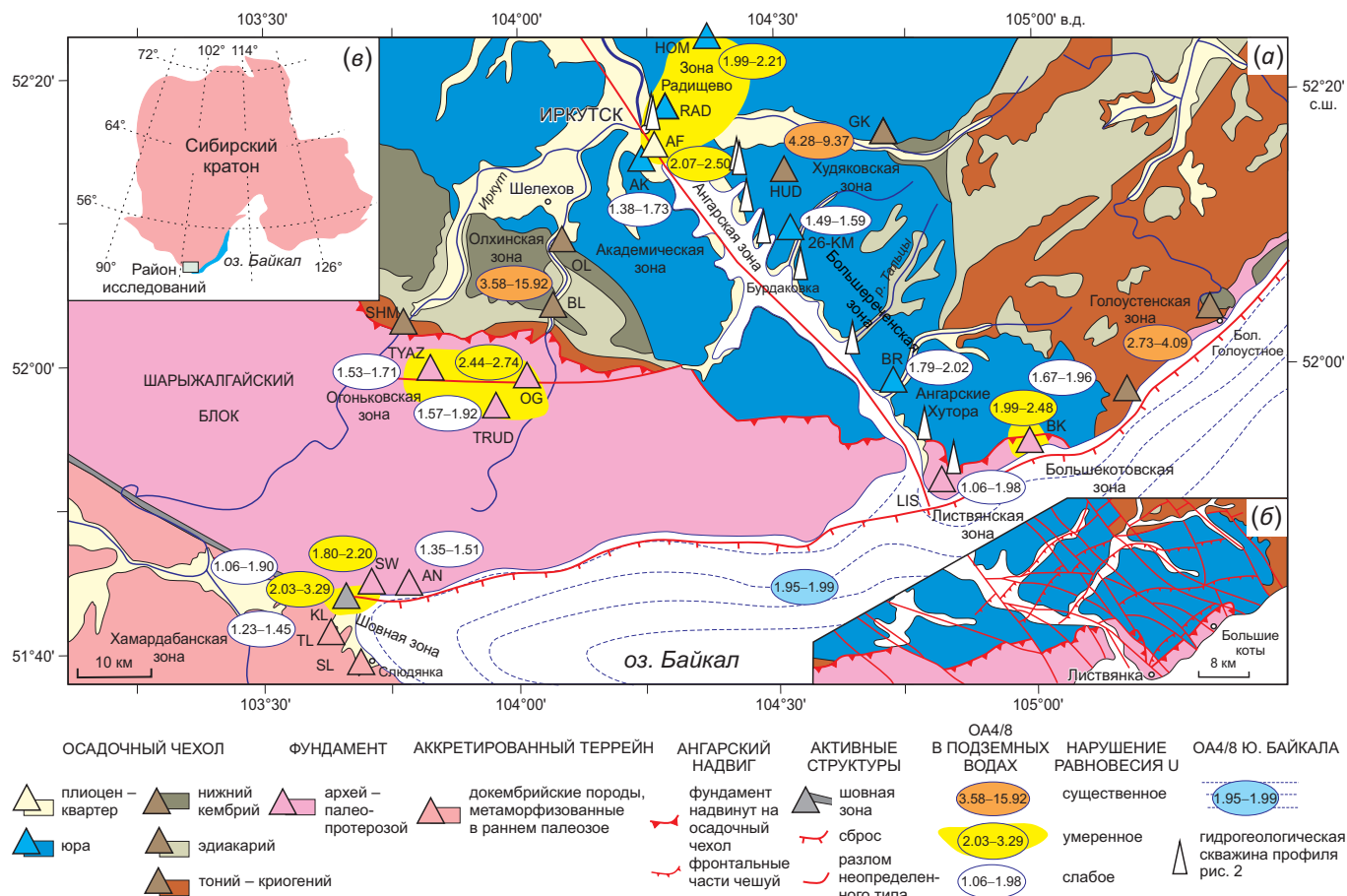


Рис. 1. Схема зональности ОА4/8 подземных вод в Иркутском Предбайкалье (а). На врезке (б) показаны разломы в районе пос. Листвянка [Zamaraev et al., 1983], а на врезке (е) – местоположение района работ на юге Сибирского палеоконтинента. Цветовым условным обозначениям разновозрастных пород соответствуют треугольные обозначения мест опробования подземных вод: из плиоцен-четвертичных отложений вдоль долины р. Ангары, залеженной по Ангарскому разлому (АФ); из юрских отложений правобережья р. Ангары – Хомутово (НОМ), Радищево (RAD), 26-й километр Байкальского тракта (26-КМ), Большая Речка (BR); левобережья р. Ангары – Академгородок (АК); из отложений неопроterозоя и нижнего кембрия – Худяково (HUD), Горячий Ключ (GK), Олха (OL), Большой Луг (BL), Шаманский мыс (SHM); из фундамента Сибирской платформы – Тешин Язык (ТЯЗ), Огоньки (OG), Трудный (TRUD), Свифт (SW), Ангасолка (AN), Листвянка (LIS); из шовной зоны между фундаментом Сибирской платформы и Хамардабанским террейном – Култук (KL); из Хамардабанского террейна – Талая (TL), Слюдянка (SL).

Fig. 1. Schematic map showing OА4/8 groundwater zoning in the area near the city of Irkutsk and Lake Baikal (Irkutsk Prebaikalia) (a). Inset (б) – faults near Listvyanka village [Zamaraev et al., 1983]. Inset (е) – study area in the southern Siberian paleocontinent. Colour codes for rock ages correspond to triangular markers for groundwater sampling sites. Samples were taken from Pliocene-Quaternary sediments along the Angara River valley (following the Angara fault, АF); Jurassic sediments of the right bank of Angara River – Khomutovo (НОМ), Radishchevo (RAD), 26th kilometer of the Baikal highway (26-КМ), Bolshaya Rechka (BR); left bank of Angara River – Akademgorodok (АК); Neoproterozoic and Lower Cambrian sediments – Khudyakovo (HUD), Goryachy Klyuch (GK), Olha (OL), Bolshoi Lug (BL), Shaman Mys (SHM); basement of the Siberian platform – Teschin Yazyk (ТЯЗ), Ogonki (OG), Trudnyi (TRUD), Swift (SW), Angasolka (AN), Listvyanka (LIS); suture zone between the basement of the Siberian platform and the Khamardaban terrane – Kultuk (KL); Khamardaban Terrane – Talaya (TL), Slyudyanka (SL).

солончатых вод (ОМ = 1.9–2.8) между зонами соленых вод (ОМ = 11–14) и рассолов (ОМ = 67–69). Несмотря на инверсию минерализации вод, значения ОА4/8 последовательно нарастают с глубиной от зоны соленых вод (ОА4/8 = 3.49–4.01) через промежуточную зону солончатых вод (ОА4/8 = 5.85–5.88) к зоне рассолов (ОА4/8 = 7.04–7.22).

4. ЛАТЕРАЛЬНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ

Минеральные воды и рассолы дают высокие значения ОА4/8 в интервале от 3.5 до 15.9. Пресные подземные воды характеризуются умеренными и низкими значениями ОА4/8. В качестве граничного значения принимается состав ЮБР (1.95–1.99). Растворенный уран мигрирует в виде уранил-иона UO_2^{2+} , в котором он находится в своей высшей степени окисления (+6). Восстановленные формы U(+4) практически не растворимы в воде, поэтому по концентрации урана в воде можно делать косвенную оценку окислительно-восстановительных свойств среды (при взаимодействии

вода – порода и в процессе последующего транспорта подземных вод).

4.1. Зоны существенного нарушения равновесия изотопов U

ОА4/8 возрастает существенно в минерализованных подземных водах из эвапоритовых толщ, включающих карбонаты, насыщенные гипсом и ангидритом. Выделяются три гидрогеохимические зоны: Олхинская (неопротерозойско-нижнекембрийские отложения, ОА4/8 = 3.58–15.92), Голоустенская (неопротерозойские отложения, ОА4/8 = 2.73–4.09) и Худяковская (нижнекембрийские отложения, перекрытые тонким покровом юрских отложений, ОА4/8 = 4.28–9.37) (рис. 3).

В Олхинской гидрогеохимической зоне подземные воды опробованы в терригенных и карбонатных эвапоритовых отложениях неопротерозоя и нижнего кембрия. На диаграмме ОА4/8 – 1/U фигуративные точки подземных вод обозначают тренд возрастания ОА4/8 от 3.58 до 15.92 со слабым повышением 1/U (от 0.73 до

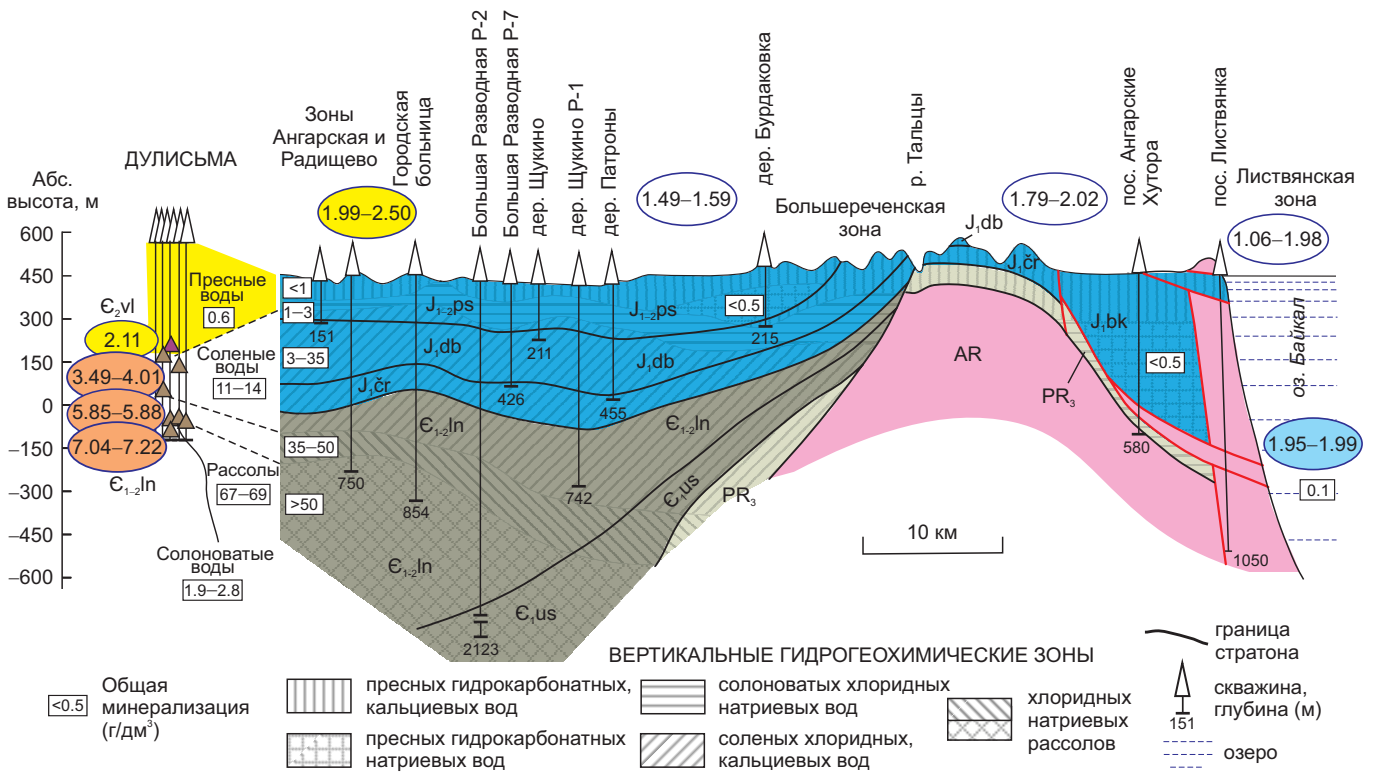


Рис. 2. Схема корреляции гидрогеохимических разрезов Иркутск–Листвянка Прииркутской впадины (южный край Сибирского палеоконтинента) и нефтегазоконденсатного месторождения Дулисыма (внутренняя часть палеоконтинента).

Условные обозначения см. рис. 1. Стратиграфические подразделения: PR₃ – неопротерозой, нерасчлененный; кембрийские свиты: E_{1us} – усольская, E_{1-2ln} – литвинцевская, E_{3vl} – верхоленская (Дулисыма, проба обозначена бордовым треугольником); юрские свиты: J_{1bk} – байкальская, J_{1cr} – Черемховская (нижняя подсвита или заларинская базальная фация), J_{1db} – дабатская, J_{1-2ps} – присаянская. В разрезе Иркутск–Листвянка были выделены вертикальные гидрогеохимические зоны, в разрезе Дулисыма дополнительно сделаны определения ОА4/8. Профиль Иркутск–Листвянка из работы [Pinneker et al., 1968] с изменениями.

Fig. 2. Correlation scheme of the hydrochemical sections of the Irkutsk depression from Irkutsk to Listvyanka (southern edge of the Siberian paleocontinent) and the Dulisma oil and gas condensate field (inner part of the paleocontinent).

See Fig. 1 for the legend. Stratigraphic units: PR₃ – Neoproterozoic, not dismembered; Cambrian Formations: E_{1us} – Usolie, E_{1-2ln} – Litvintsev, E_{3vl} – Verkholenk (Dulisma; burgundy triangle – sample); Jurassic Formations: J_{1bk} – Baikal, J_{1cr} – Chermkhovo (lower sub-formation or Zalari basal facies), J_{1db} – Dabat, J_{1-2ps} – Sis-Sayan. Vertical hydrochemical zones are identified in the Irkutsk–Listvyanka section. OA4/8 values are given for the Dulisma section. The Irkutsk–Listvyanka profile is modified after [Pinneker et al., 1968].

Таблица 1. Диапазоны ОА4/8 и [U] в глубинной воде Южного Байкала, в подземных водах Иркутского Предбайкалья и нефтегазоконденсатного месторождения Дулисыма**Table 1.** Ranges of ОА4/8 and [U] in deep waters from the southern part of Baikal Lake, groundwaters of Irkutsk Prebaikalia and the Dulisma oil and gas condensate field

Зона	Вода, разновозрастные 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 метров до >1000 м		0.44	0.46	1.95	1.99
Иркутское Предбайкалье, латеральные зоны					
Существенное нарушение циклического равновесия изотопов U					
Олхинская	Неопротерозой – нижний кембрий	0.1	1.37	3.58	15.92
Голоустенская	Неопротерозой	0.018	1.37	2.73	4.09
Худяковская	Нижний кембрий (отложения под слоем юрских песчаников)	0.01	1.01	2.20	9.37
Умеренное нарушение циклического равновесия изотопов U					
Радищево	Юра	0.2	0.87	1.99	2.21
Ангарская	Юра и плиоцен – квартал	3.5	6.9	2.07	2.50
Большекетовская	Нижний докембрий и юра	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	Юра	0.012	0.014	1.49	2.02
Академическая	Юра	0.44	0.86	1.38	1.73
Хамардабанская	Коллизионный метаморфический террейн	0.25	0.41	1.23	1.45
Дулисыма, 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

2.44 дм³/мкг), отражающим прогрессирующее растворение эвапоритового компонента карбонатов. В скважинах пресной воды дер. Большой Луг, наряду с трендом растворения эвапоритового компонента, проявлен тренд, направленный параллельно оси абсцисс до максимального значения $1/U = 10.53$ дм³/мкг при $ОА4/8 = 4.43$. Три пробы родниковой воды из Голоустенской гидрогеохимической зоны соответствуют наименее неравновесным составам подземных вод Олхинской гидрогеохимической зоны.

В Худяковской гидрогеохимической зоне воды родников и скважин находятся в поле распространения юрских отложений с отдельными выходами нижнекембрийских пород. Повышенные значения $ОА4/8$ (4.28–9.37) связаны с поступлением вод из эвапоритовой неопротерозойско-нижнекембрийской толщи. Между тем [U] в пробах этой территории снижается до 0.01 мкг/дм³.

В отличие от чисто эвапоритового тренда вод Олхинской зоны, воды Худяковской зоны дают весьма протяженный тренд подземных вод, которые скапливаются и циркулируют в покровке юрских песчаников. В отличие от вод Большекетовской зоны, в Худяковской зоне эти воды содержат компонент высокого $ОА4/8$.

Данные по пресным и минеральным водам Дулисымы, нанесенные для сравнения, показывают рассеяние точек тренда растворения эвапоритового компонента в диапазоне значений $1/U$, проявляющемся при добавлении компонента пресных вод.

4.2. Зоны слабого нарушения равновесия изотопов U

Циклическое равновесие изотопов урана слабо нарушено в подземных водах зон, не проявляющих деформационной активности: в метаморфических породах

Шарыжалгайского блока (Листвянской, $OA4/8 = 1.06-1.98$, Ангасольской, $OA4/8 = 1.35-1.51$), в юрских отложениях осадочного чехла Сибирской платформы в Прииркутской впадине (Академической, $OA4/8 = 1.38-1.73$, Большереченской, $OA4/8 = 1.49-2.02$) и в метаморфических породах слюдянского комплекса Хамардабанского террейна (Слюдянской, $OA4/8 = 1.23-1.45$) (рис. 4).

В родниках Большереченской гидрогеохимической зоны определен интервал $1/U = 71-83$ с интервалом $OA4/8 = 1.49-2.02$ (см. рис. 3). Максимальное $OA4/8$,

близкое по значению ЮБР, принимается в качестве восстановленного компонента воды Южного Байкала (т.е. характеризуется низкими концентрациями урана). Этот компонент представляет собой артезианские напорные воды, для которых свойственна низкая минерализация ($OM < 0.5 \text{ г/дм}^3$) [Pinneker et al., 1968]. Относительное снижение $OA4/8$ свидетельствует о смешении ЮБР с менее восстановленным компонентом подземных вод (в предельном выражении такой компонент дает подземная вода из зоны окисления).

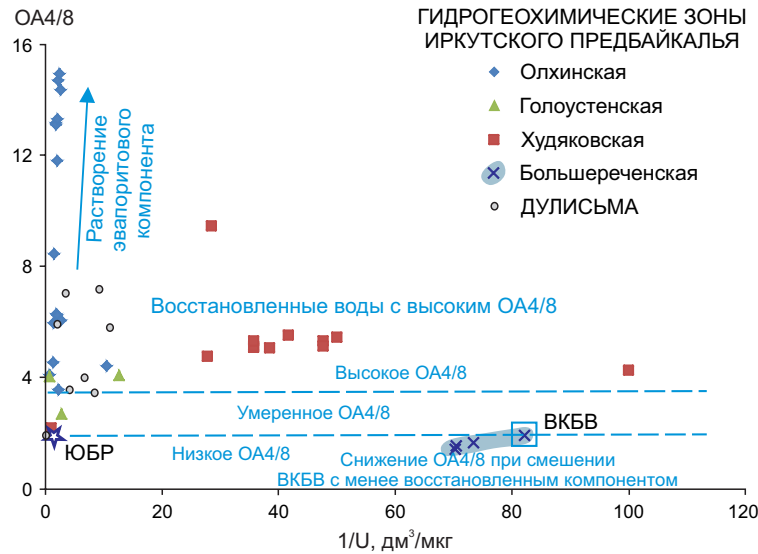


Рис. 3. Диаграмма $OA4/8 - 1/U$ подземных вод Олхинской, Голоустенской, Худяковской и Большереченской гидрогеохимических зон Иркутского Предбайкалья в сопоставлении с данными по подземным водам Дулисы. ЮБР – Южно-Байкальский резервуар. ВКБВ – восстановленный компонент байкальской воды (с низким [U]).

Fig. 3. Diagram $OA4/8$ vs $1/U$ for groundwaters from the Olkha, Goloustnoe, Khudyakovo and Bolshaya Rechka hydrogeochemical zones of Irkutsk Prebaikalia in comparison with the data on groundwaters from the Dulisma field. ЮБР – South Baikal reservoir. ВКБВ – reduced component of Baikal water (low [U]).

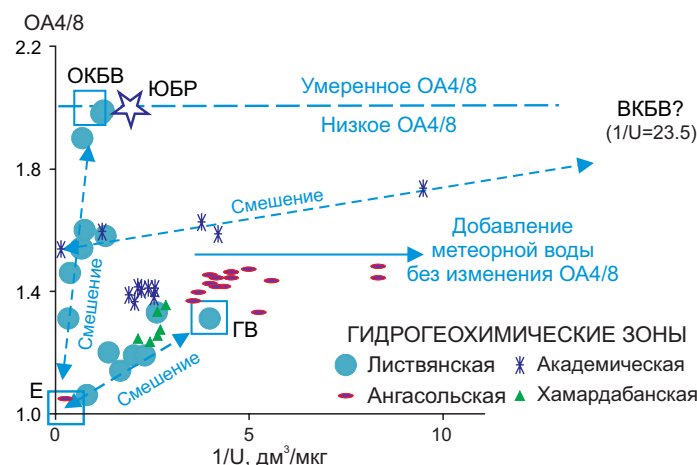


Рис. 4. Диаграмма $OA4/8 - 1/U$ подземных вод со слабым нарушением равновесия изотопов U. E – компонент застойных вод равновесного урана из зоны окисления (E – equilibrated, $OA4/8 \approx 1$). ОКБВ – окисленный компонент байкальской воды (с высоким [U]). ГВ – горная вода. ВКБВ – восстановленный компонент байкальской воды (с низким [U]), возможно, присутствующий в виде примеси в водах Академической зоны.

Fig. 4. Diagram $OA4/8 - 1/U$ for groundwaters with the slightly imbalanced equilibrium of U isotopes. E – equilibrated component of stagnant water from the oxidation zone ($OA4/8 \approx 1$). ОКБВ – oxidized component of Baikal water (high [U]). ГВ – mountain water. ВКБВ – reduced component of Baikal water (low [U]), possible admixture to waters of the Academic zone.

В районе пос. Листвянка опробовались родники и скважины в аллохтонных пластинах Ангарского надвига, сложенных метаморфическими породами платформенного фундамента и юрскими конгломератами байкальской свиты. Подземные воды Листвянской зоны дают пучок точек, расходящийся от высоких концентраций равновесного U зоны окисления. Крутой тренд пучка точек при пониженных значениях 1/U (повышенном [U]) восходит к $OA4/8 = 1.98$, соответствующему значению в воде Южного Байкала. Тренд обусловлен смешением застойной воды из зоны окисления с водой озера. Пологий тренд ограничивает пучок точек при повышенных значениях 1/U (пониженном [U]) и значениях $OA4/8$, не превышающих 1.33. Этот тренд отражает смешение застойных вод из зоны окисления с компонентом, который образуется в результате взаимодействия метеорных вод с метаморфическими породами. Такой состав характерен для поверхностных и подземных вод горных территорий [Chabaux et al., 2008] и обозначается здесь как компонент горной воды (ГВ).

В подземных водах других зон со слабым нарушением равновесия изотопов U (Ангасольской, Хамардабанской) значения $OA4/8$ и 1/U не обнаруживают явной связи с параметрами вод Южного Байкала. Подобно подземным водам Листвянской зоны, подземные воды ограниченно разбавлены метеорными водами в Слюдянской зоне ($1/U = 2.1-2.9$) и сильнее разбавлены в Ангасольской зоне ($1/U = 3-9$). Фигуративные точки пяти родников Академической зоны дают линейный тренд смешения от точки $OA4/8 = 1.53$, $1/U = 0.17$ до точки $OA4/8 = 1.73$, $1/U = 8.33$. Точка пересечения с линией, субпараллельной оси абсцисс, при значении $OA4/8$ ЮБР дает значение $1/U = 23.5$, которое может соответствовать конечному восстановленному компоненту байкальской воды, входящему в виде примеси (около 40 % и менее) в подземные воды Академической зоны.

4.3. Зоны умеренного нарушения равновесия изотопов U

Подземные воды только с умеренным $OA4/8$ (соответствующим значению ЮБР и превышающим его) определены в двух зонах: Ангарской (плиоцен-четвертичные отложения в Ангарском разломе, $OA4/8 = 2.07-2.50$) и Радищево (юрские отложения северной части г. Иркутска и пригорода, $OA4/8 = 1.99-2.21$) (рис. 5). Умеренное $OA4/8$ сочетается со значениями ниже ЮБР в трех зонах: Большекотовской (метаморфические и магматические породы раннего докембрия вблизи Обручевского сброса, $OA4/8 = 1.67-2.48$) (рис. 6), Огоньковской (метаморфические и магматические породы раннего докембрия вблизи северо-северо-восточной надвиговой границы Шарьжалгайского блока, $OA4/8 = 1.53-2.74$) (рис. 7) и Шовной (милониты Главного Саянского разлома между фундаментом Сибирского палеоконтинента и Хамардабанским террейном, $OA4/8 = 1.06-3.29$) (рис. 8).

На диаграмме рис. 5 фигуративные точки подземных вод Ангарской зоны характеризуются вариациями $OA4/8$ и 1/U, отражающими дифференцированное проявление деформационных эффектов в активном Ангарском разломе (значительные изменения $OA4/8$ при относительно небольших вариациях 1/U). Фигуративные точки подземных вод зоны Радищево распределяются вдоль оси абсцисс при значении $OA4/8$, слегка превышающем значение резервуара Южного Байкала. Такой состав подземных вод отражает смешение компонента ЮБР с трещинной водой метеорного происхождения при вариациях окисленности среды выше и ниже, чем в воде Южного Байкала. Вода ЮБР является преобладающим компонентом подземных вод зоны Радищево, в отличие от подземных вод Академической зоны, в которой она выступает в качестве компонента – примеси (см. рис. 4).

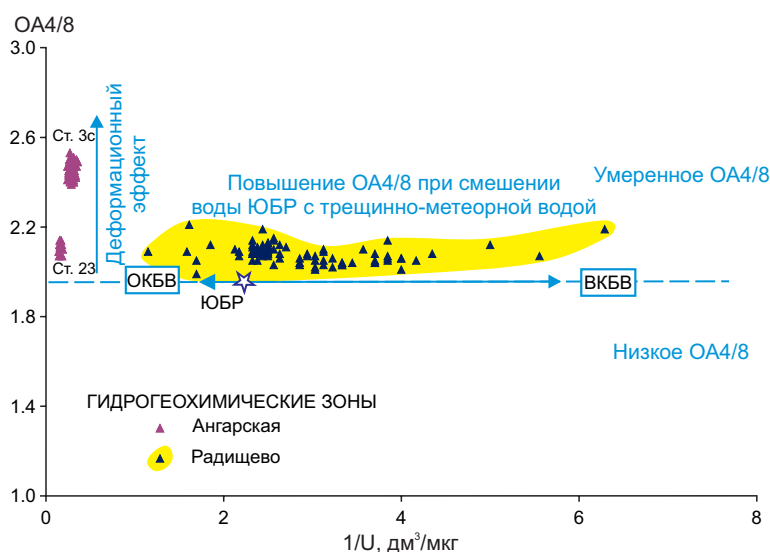


Рис. 5. Диаграмма $OA4/8 - 1/U$ родниковых вод в зонах Ангарской и Радищево. ЮБР, ОКБВ, ВКБВ – обозначения на рис. 4.

Fig. 5. Diagram $OA4/8$ vs $1/U$ for spring waters from the Angara and Radishchevo hydrogeochemical zones. ЮБР, ОКБВ, ВКБВ – see Fig. 4 for full names.

В береговой приозерной Большекотовской зоне является резкое различие компонентного состава родниковых и скважинных вод (см. рис. 6). В тех и других участвует компонент резервуара Южного Байкала. В родниковой воде озерный компонент ЮБР обедняется ураном в восстановленной среде с переходом в компонент ВКБВ. Компонент смешения с ВКБВ отличается повышенным $OA4/8$, обусловленным деформационным эффектом, и повышенным $[U]$, свидетельствующим о вскрытии трещинами окисленных пород. В отличие от родников, скважины вскрыли байкальскую воду в застойной окисленной среде со смешением компонентов,

подобным крутому тренду подземных вод Листвянской зоны (см. рис. 4). В скважине ВК-6 (глубина 24 м) для воды получено значение $OA4/8 = 1.96$, соответствующее компоненту ЮБР, в скважине ВК-7 (глубина 45 м) – пониженное значение $OA4/8$ (1.67). Концентрации U (соответственно 2.5 и 3.5 $мкг/дм^3$) почти на порядок превысили содержание в глубинной байкальской воде.

Подземные воды Огоньковской гидрогеохимической зоны по компонентному составу U также могут иметь связь с резервуаром Южного Байкала посредством проникновения вод по ослабленным пологим разрывам Ангарского надвига. Огоньковская гидроизотопная зона

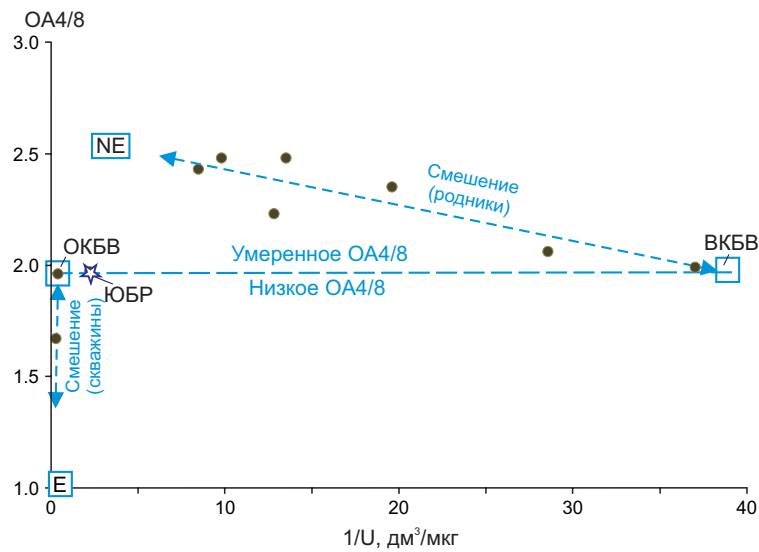


Рис. 6. Диаграмма $OA4/8 - 1/U$ подземных вод Большекотовской гидрогеохимической зоны. Компоненты: Е, NE – соответственно равновесного и неравновесного урана (с высоким $[U]$); ЮБР, ОКБВ, ВКБВ – обозначения на рис. 4.

Fig. 6. Diagram $OA4/8$ vs $1/U$ for groundwaters from the Bolshie Koty hydrogeochemical zone. Components: E, NE – equilibrated and non-equilibrated, respectively (high $[U]$). ЮБР, ОКБВ, ВКБВ – see Fig. 4 for full names.

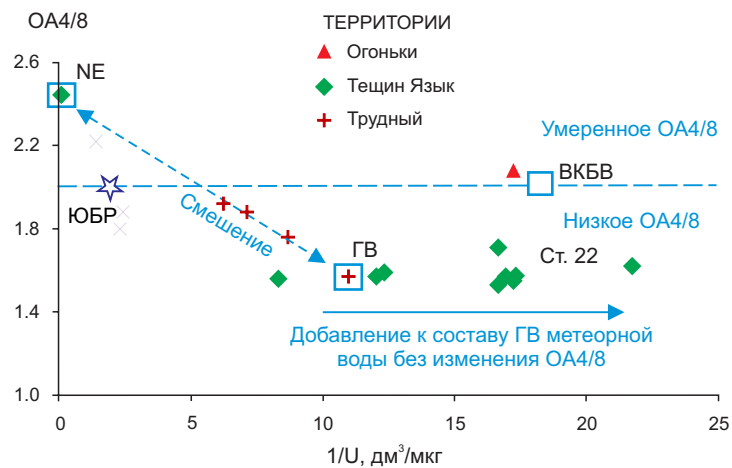


Рис. 7. Диаграмма $OA4/8 - 1/U$ подземных вод Огоньковской гидрогеохимической зоны. NE – компонент неравновесного урана (с высоким $[U]$) и умеренным $OA4/8$ (с низким $[U]$). ЮБР, ВКБВ, ГВ – обозначения на рис. 4. ВКБВ нуждается в обосновании дополнительными данными.

Fig. 7. Diagram $OA4/8$ vs $1/U$ for groundwaters from the Ogonki hydrogeochemical zone. NE – non-equilibrated (high $[U]$) and moderate $OA4/8$ (low $[U]$). ЮБР, ВКБВ, ГВ – see Fig. 4 for full names. ВКБВ should be substantiated by additional data.

находится в кристаллических породах фундамента, надвинутого на осадочный чехол, поэтому в компонентном составе U подземных вод не исключается возможность проявления характеристик автохтона отложений осадочного чехла. В районе железнодорожной станции Огоньки имеется родник, характеризующийся значением OA4/8, которое дает состав ВКБВ (см. рис. 7). В Огоньковской зоне родник с такой характеристикой урана пока единственный, поэтому состав ВКБВ нуждается в дополнительном обосновании с выделением тренда смешения.

Вода самоизливающейся скважины (ст. ТУАЗ) аномально обогащена ураном ([U] = 15 мкг/дм³) при умеренном возрастании OA4/8 (2.44). На диаграмме OA4/8 – 1/U состав ТУАЗ характеризует неравновесный компонент (NE – non-equilibrated U), от которого протягивается тренд точек подземных вод участка Трудный к составу, обозначенному как компонент ГВ. Воды родника ст. 22 образуют протяженный тренд смешения подземных вод этого компонента с метеорными водами.

В милонитах Шовной гидрогеохимической зоны (рис. 8) проводилось детальное опробование вод в скважинах (глубиной от 60 до 120 м) и родниках. Определены интервалы OA4/8 от 1.06 до 3.29 и [U] от 0.035 до 3.8 мкг/дм³ [Chebykin et al., 2015; Rasskazov et al., 2015b].

На диаграмме OA4/8 – 1/U (рис. 8) состав U ст. 45, близкий к циклическому равновесию (OA4/8 ≈ 1) с повышенным [U] (низкими значениями 1/U), характеризует зону окисления, не затронутую деформациями (компонент Е). Деформации выразились в возрастании OA4/8 при повышенном [U] (ст. 8) и при снижении концентраций U на других станциях опробования. Преобладают значения: OA4/8 = 2.3–2.5, 1/U = 5–7. Редкие образцы образуют тренд смешения компонента Е зоны

окисления и преобладающего состава циркулирующей воды. Максимальное значение OA4/8 = 3.29 определено в скважине ст. 27.

Распределение фигуративных точек вдоль оси абсцисс вод из родников, опробованных в низких точках рельефа (ст. 29, 66), свидетельствует об активном водообмене, сопровождающемся смешением подземных трещинных вод из деформационной зоны с водами метеорного происхождения.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

В вариациях OA4/8 и [U] подземных вод охарактеризованных гидрогеохимических зон прослеживается связь подземных вод Иркутского Предбайкалья с резервуаром Южного Байкала, выявляется наложение деформационного и химического эффектов, фиксируется смешение подземных вод с контрастными гидрогеохимическими характеристиками.

5.1. Гидроизотопная характеристика резервуара Южного Байкала и ее значение для изучения обмена озерных и подземных вод

При существующей динамике водообмена для полной смены огромного резервуара оз. Байкал (23.6 тыс. км³) требуется не более 400 лет [Votintsev, 1961]. Отношение активностей ²³⁴U/²³⁸U показательно для определения источников вод, участвующих в водообмене резервуара Южного Байкала, – стока поверхностных и подземных вод в озеро и проникновения вод из озера под сопредельные территории.

На поверхности южной части озера были получены значения OA4/8 1.95±0.27 [Edgington et al., 1996]. Подобный диапазон варьирующихся значений был определен также в р. Селенге и ее притоках. Было высказано предположение о привносе около 80 % урана в озеро

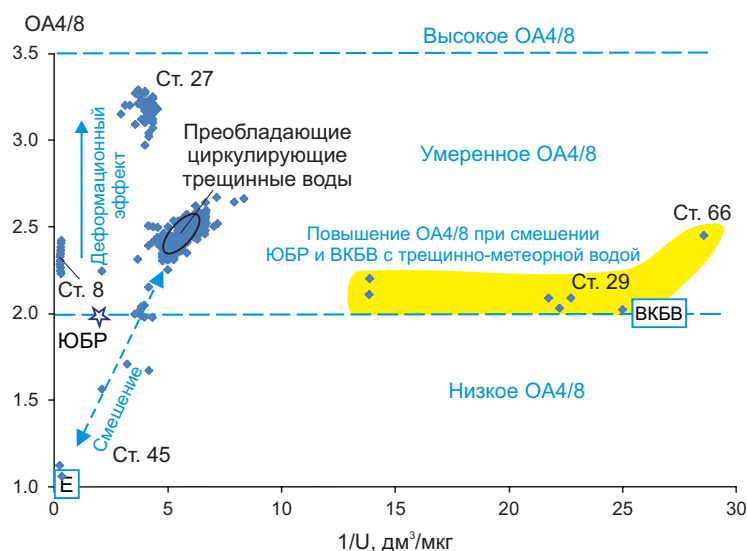


Рис. 8. Диаграмма OA4/8 – 1/U подземных вод Шовной гидрогеохимической зоны. Усл. обозначения см. рис. 5. ЮБР, ВКБВ – обозначения на рис. 4.

Fig. 8. Diagram OA4/8 vs 1/U for groundwaters from the Suture hydrogeochemical zone. See Fig. 5 for the legend. ЮБР, ВКБВ – see Fig. 4 for full names.

этой рекой [Pampura et al., 1996]. В р. Селенге были определены сезонные вариации $OA4/8$ и $[U]$ [Chebykin et al., 2012, 2018].

В качестве не менее важного показателя связи байкальских и подземных вод, вместе с отношением изотопов урана, используется отношение изотопов стронция. Для проб воды, отобранных в Южном Байкале с глубины от первых метров до 1000 м и более, которые дали преимущественные интервалы $OA4/8 = 1.95-1.99$ и $[U] = 0.44-0.46$ мкг/дм^3 (с повышением в отдельных пробах $[U]$ до 0.53 мкг/дм^3) [Rasskazov et al., 2015a], были определены значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = \sim 0.70863$ (частично в расширенном диапазоне $0.70850-0.70885$) и $[Sr] = 98-100$ мкг/дм^3 . Измерения по пробам воды р. Селенги, отобранным в дельте реки и в г. Улан-Удэ, обнаружили повышенные значения $OA4/8$ (2.07 и 2.24) и $[U]$ (соответственно 1.43 и 1.19 мкг/дм^3) при пониженных значениях $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.70763 и 0.70796) и повышенных $[Sr]$ (240 и 180 мкг/дм^3).

Совместные U–Sr-изотопные данные для воды Южного Байкала были опубликованы прежде в работе [Chabaux et al., 2011] для двух образцов, отобранных с поверхности вблизи южного берега озера. По одному из них (BKL 31) полученные результаты были сопоставимы с указанными данными по воде р. Селенги: $U = 0.52$ мкг/дм^3 , $OA4/8 = 2.042$, $Sr = 131$ мкг/дм^3 , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70788$; по другому образцу (BP 3) было получено сравнительно низкое $OA4/8$ (1.924) при $[U] = 0.46$ мкг/дм^3 и повышенное $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.70858) при $[Sr] = 83$ мкг/дм^3 .

Следовательно, U–Sr-изотопная систематика, с одной стороны, дает эталон однородного глубинного резервуара Южного Байкала, с другой стороны, служит чувствительным индикатором контаминации поверхностных и прибрежных вод озера, которая выражается в расширении диапазонов концентраций и изотопных отношений U и Sr относительно значений однородного глубинного Южно-Байкальского резервуара.

На диаграмме $OA4/8 - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ резервуар Южного Байкала вписывается в систему смешения подземных вод из милонитов Шовной зоны, которая характеризуется конечными компонентами E (endmember of U in secular equilibrium) и NE (endmember of non-equilibrated U) (рис. 9).

Фигуративные точки подземных вод из архейских и протерозойских гнейсов и гранитов Шарыжалгайского выступа заметно смещены правее U–Sr изотопной системы подземных вод из шовных милонитов. Обогащение подземных вод радиогенным изотопом ^{87}Sr отражает его накопление в древнейших породах, обогащенных радиоактивным рубидием. Высокое отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, таким образом, служит маркером источников подземных вод из пород Шарыжалгайского выступа.

Проникновение воды Южного Байкала в береговую Ливствянскую зону отчетливо проявлено в виде компонента неравновесного U в крутом тренде смешения подземных вод (см. рис. 4). Такому проникновению способствует распространение пологих надвиговых разрывов в береговых породах оз. Байкал (см. рис. 2).

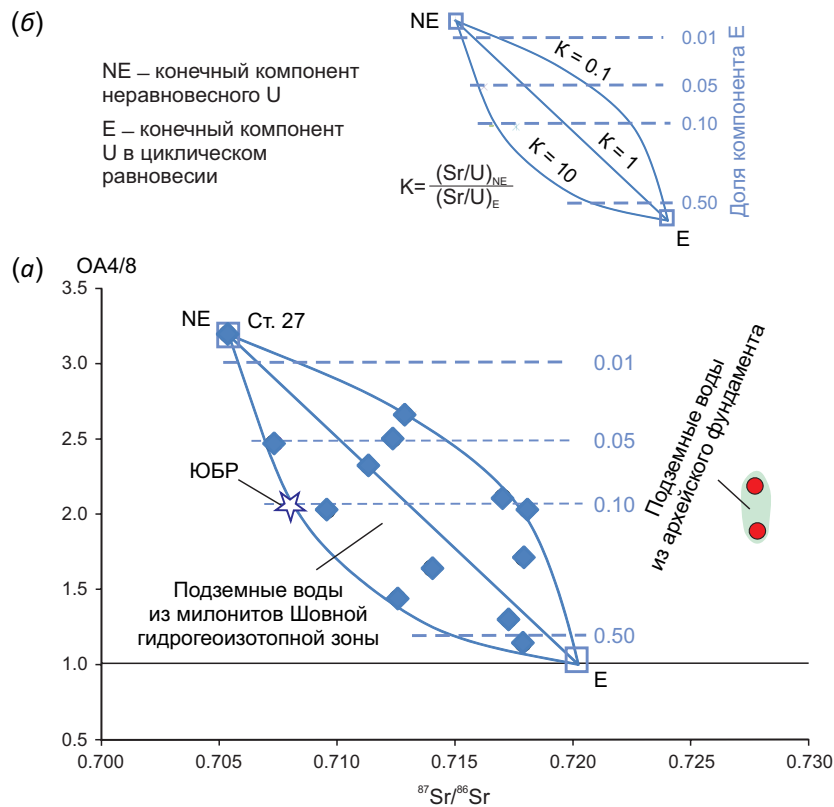


Рис. 9. $OA4/8-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ система смешения подземных вод из милонитов Шовной гидрогеохимической зоны.
Fig. 9. $OA4/8-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mixing system of groundwaters from milonites of the Suture hydrogeochemical zone.

От компонента Е с равновесным U, однако, также протягивается пологий тренд, не связанный с байкальской водой. Компонент смещения этого тренда с неравновесным U имеет сходство с U-изотопной характеристикой подземных вод из береговой Ангасольской зоны, не обнаруживающей связи с резервуаром Южного Байкала.

Из резервуара Южного Байкала вода поступает в Иркутское водохранилище и далее в р. Ангару вдоль активного Ангарского разлома (гидрогеохимические зоны Ангарская и Радищево). В подземных водах из юрских отложений в зоне Радищево (на северо-северо-восточном побережье р. Ангары) [U] дает расширенный интервал значений (0.20–0.87 мкг/дм³) при слабом возрастании ОА4/8 до 1.99–2.21 относительно значения Южно-Байкальского резервуара, который может играть здесь роль буфера для образования протяженного тренда варьирующихся значений 1/U с добавлением трещинно-метеорной составляющей (см. рис. 5).

В подземных водах из юрских отложений в Академической зоне (на юго-юго-западном побережье р. Ангары) показатели ОА4/8 (1.38–1.73) существенно ниже байкальских, хотя интервал [U] (0.44–0.86 мкг/дм³) перекрывается значением концентрации U в воде Южного Байкала. На этой территории компонент воды Южного Байкала не образует какого-либо тренда смешения с подземными водами (см. рис. 4).

Буферирующая роль воды резервуара Южного Байкала, подобная воде зоны Радищево, проявляется в

значениях ОА4/8, соответствующих южно-байкальскому и несколько уступающих этому значению в напорных артезианских водах Большереченской гидрогеохимической зоны (см. рис. 3). В интерпретации параметра ОА4/8 как показателя вод резервуара Южного Байкала весьма вероятно, что глубинная южно-байкальская вода проникала по ослабленным при рифтогенезе пологим разрывам, связанным с Ангарским надвигом, не только в береговые породы фундамента Листвянской и Большекетовской зон и юрские отложения байкальской свиты Ангарских Хуторов, но и в юрские отложения гидрогеохимических зон Большереченской и Радищево, а также, предположительно, в породы платформенного фундамента Огоньковской зоны (рис. 10).

5.2. Деформационный эффект вариаций ОА4/8

Деформационный эффект максимально выражен в воде скважины ст. 27 из милонитов Шовной гидрогеохимической зоны (см. рис. 8, 9). Мониторинг ОА4/8 в воде этой станции показал процесс подготовки и реализации сильного землетрясения на Южном Байкале. Наблюдения начались в январе – октябре 2013 г., когда на Южном Байкале проявилась слабая сейсмическая нестабильность. Значения ОА4/8 часто колебались в интервале 3.20–3.29. Усиление сейсмической нестабильности отразилось в импульсном снижении ОА4/8 до значений ниже 3.0 с переходом после максимума 04.03.2015 г. к малоамплитудным вариациям ОА4/8, на фоне которых случилось землетрясение Голоустное

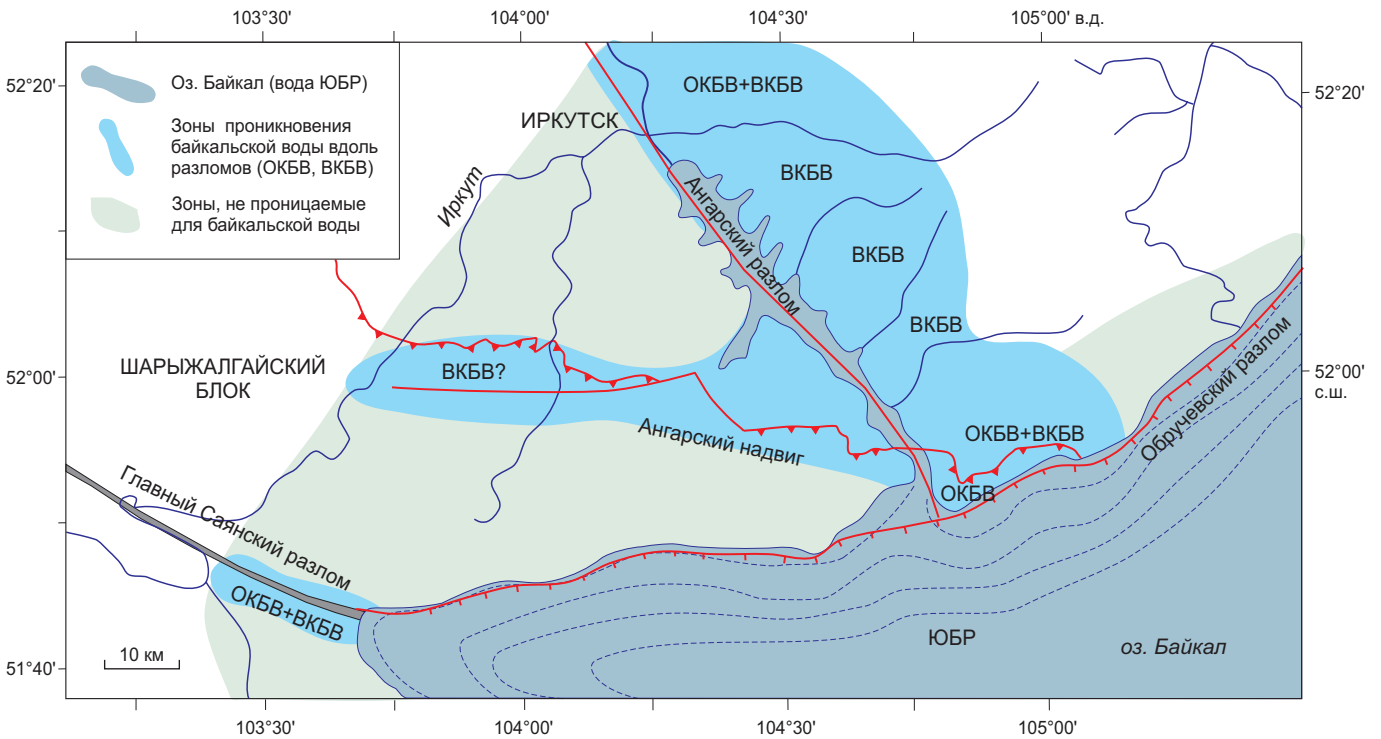


Рис. 10. Схема проникновения воды ЮБР вдоль разломов Иркутского Предбайкалья. Усл. обозначения см. рис. 1. ВКБВ? обозначает предварительное заключение об Огоньковской ветви проникновения воды ЮБР.

Fig. 10. Penetration of the ЮБР water along faults of the Irkutsk Prebaikalia. See Fig. 1 for the legend. ВКБВ? – preliminary conclusion on the Ogonki branch of the ЮБР water penetration.

с магнитудой 4.7. В дальнейшем землетрясения отсутствовали и значения ОА4/8 плавно менялись с относительным возрастанием квазипериодов от 10 до 16 месяцев. Частые колебания ОА4/8, начавшиеся 03.08.2018 г., известили о начальной фазе новой сейсмической нестабильности территории (рис. 11, а).

Дополнительная (более наглядная) информация о сейсмоопасном состоянии в Южно-Байкальской впадине получена при анализе временных вариаций ²³⁴U. Землетрясение Голоустное произошло на фоне снижающихся концентраций ²³⁴U с приближением к абсолютному минимуму значений ст. 27 (рис. 11, б).

5.3. Гидрогеохимический эффект вариаций ОА4/8

Значения ОА4/8 повышаются существенно в воде из эвапоритовых слоев. Возрастание параметра не имеет

прямой зависимости от общей минерализации. В расколах наблюдается снижение ОА4/8 относительно значений слабоминерализованных вод. Так, в расколе 300-метрового карьера кимберлитовой трубки Нюрбинской, отобранном 05.07.2014 г. (ОМ = 206 г/дм³), получено невысокое ОА4/8 (3.55), сопоставимое с интервалом ОА4/8 малоглубинных соленых вод газоконденсатного месторождения Дулисыма (ОМ = 11–14 г/дм³). В расколе из глубоких слоев этого месторождения (ОМ = 67–69 г/дм³) получен интервал более высоких значений ОА4/8 (7.04–7.22) (см. рис. 2, табл. 1).

Самое высокое ОА4/8 определено в слабоминерализованной воде, извлекаемой скважиной в Олхинской зоне с глубины 350 м. Минеральная вода продается под брендом «Иркутская» с обозначением состава: гидрокарбонаты – 225–350 мг/дм³, сульфаты – 600–

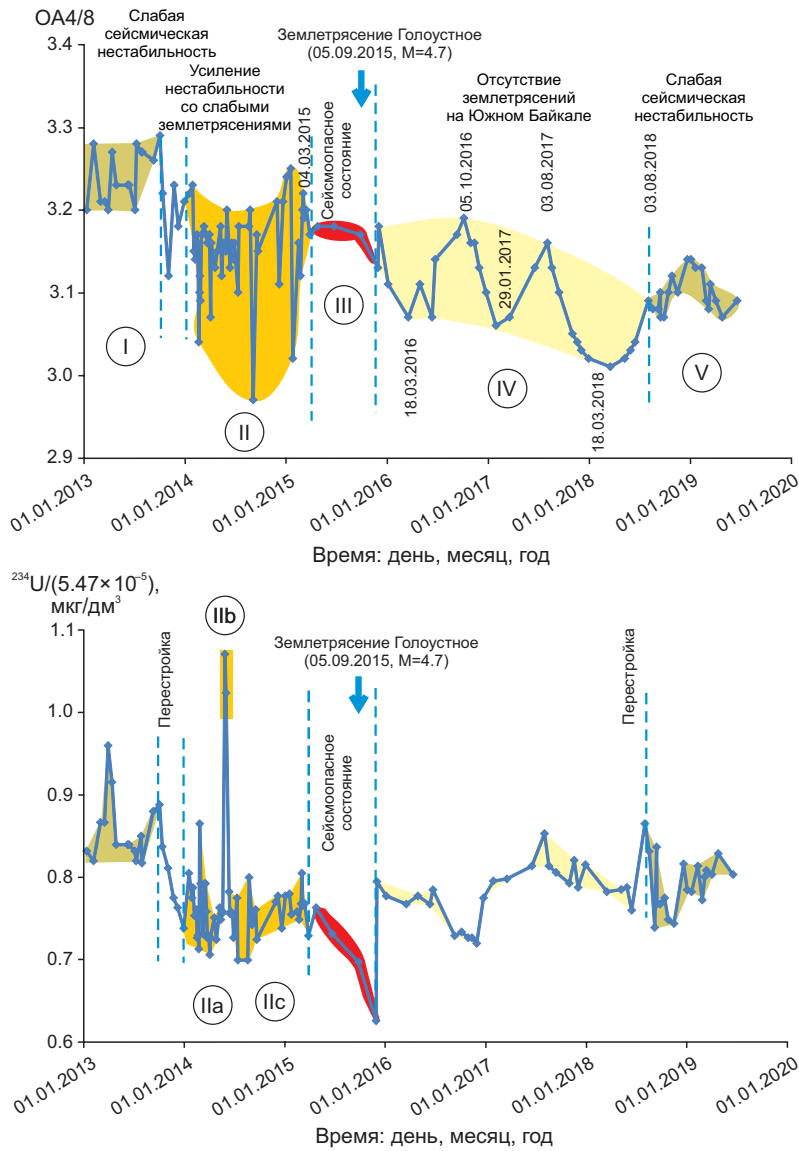


Рис. 11. Временные вариации ОА4/8 (а) и концентраций ²³⁴U (б) в воде ст. 27 с оценкой интервала сейсмоопасного состояния в Южно-Байкальской впадине.

Fig. 11. Temporal variations of OA4/8 (a) and ²³⁴U concentration (b) in water from sampling site 27, and an estimation of seismic hazard interval for the South Baikal Basin.

1100 мг/дм³, хлориды – 200–460 мг/дм³, кальций – 200–320 мг/дм³, магний – 50–150 мг/дм³, натрий+калий – 100–350 мг/дм³.

Мониторинг вод показал, однако, более широкие вариации концентраций элементов. Так, в пробе воды, отобранной 20.06.2013 г., содержалось 162 мг/дм³ Са, а в ежегодных июньских пробах содержание Са последовательно возросло к 2018 г. до 470 мг/дм³ при резком снижении в 2019 г. до 320 мг/дм³. Сходным образом варьировались концентрации Sr (от 1540 мкг/дм³ в 2013 г. до интервала 4500–4600 мкг/дм³ в 2017–2018 гг. со снижением до 3100 мкг/дм³ в 2019 г.). Очевидно, что растворение карбоната в период наблюдений сначала усиливалось, а затем снижалось.

В пробе 20.06.2013 г. было определено ОА4/8 = 11.82, в пробах 16.06.2014 г., 27.06.2015 г., 11.06.2017 г. и 13.06.2018 г. получен возрастающий ряд значений ОА4/8, соответственно 13.32, 14.41, 15.48 и 15.92 с относительным снижением к величине 15.71 в пробе 13.06.2019 г. (рис. 12). Концентрация U в минеральной воде находилась в интервале 0.47–0.50 мкг/дм³ и возрастала при максимальном химическом растворении карбоната в 2017–2018 гг. до интервала 0.53–0.58 мкг/дм³.

5.4. Смещение модифицированных компонентов Южно-Байкальского резервуара с компонентом подземных вод умеренного ОА4/8

Умеренное ОА4/8, отражающее эффект нарушения равновесия U по деформационному механизму Чердынцева – Чалова, кроме подземных вод Шовной зоны, показывают подземные воды гидрогеохимических зон Ангарской и Радищево, в долине и на правобережье р. Ангары (см. рис. 5).

В ходе мониторинга родника Радищево-1с в течение 23 месяцев (с декабря 2012 г. до ноября 2014 г.) выделено три группы вод: 1) группа возрастания ОА4/8 в верхнем пределе от 2.04 до 2.15 в период с 15.12.2012 г. до 24.08.2013 г., 2) группа хаотических вариаций ОА4/8

в интервале 2.04 до 2.15 в период с 20.09.2013 г. до 26.04.2014 г. и 3) группа пониженных ОА4/8 в интервале 2.01–2.06 в период с 03.05.2014 г. до 18.10.2014 г. Первые две группы характеризовались узким диапазоном [U] = 0.37–0.43 мкг/дм³. В третьей группе [U] последовательно снижался от 0.35 до 0.15 мкг/дм³. Источники U сменялись 07.09.2013 г. – 20.09.2013 г. и 26.04.2014 г. – 03.05.2014 г. В финальной пробе, отобранной на этой станции 01.11.2014, ОА4/8 было максимальным (2.19) при минимальной концентрации U (0.15 мкг/дм³) (рис. 13, а, б).

Этот мониторинг отразил временную смену состава подземных вод гидрогеохимической зоны Радищево со снижением [U], сопровождающимся вариациями ОА4/8. Определяющую роль играл компонент, близкий к составу ЮБР. С течением времени компонент чистого деформационного эффекта NE1 сменился компонентом NE2 смешения воды ЮБР с трещинно-метеорной водой.

В Ангарской зоне получен иной ряд наблюдений вод родника, расположенного ниже плотины Иркутской гидроэлектростанции (ст. Зс-24), с 17.11.2012 г. до 01.11.2014 г. Этот ряд разделился на две разновременные группы составов с одним диапазоном ОА4/8 (рис. 14). Одна группа сменилась другой 04.10.2013 г. – 19.10.2013 г. До этого времени ОА4/8 в верхнем пределе возрастало от 2.39 до 2.50 с повышением [U] от 3.4 до 4.1 мкг/дм³, после смены ОА4/8 в верхнем пределе снижалось от 2.50 до 2.40 при сравнительно низком [U] = 2.80–3.30 мкг/дм³. Концентрации U разновременных групп не перекрывались между собой. Рассеянный характер распределения фигуративных точек групп отразил слабую сейсмическую нестабильность Ангарского разлома.

На диаграмме ОА4/8 – 1/U облака точек разновременных групп с одинаковым диапазоном ОА4/8 разделены по значению 1/U = 0.29–0.30 дм³/мкг. Отдельная проба, отобранная 05.09.2015 г., показала значение

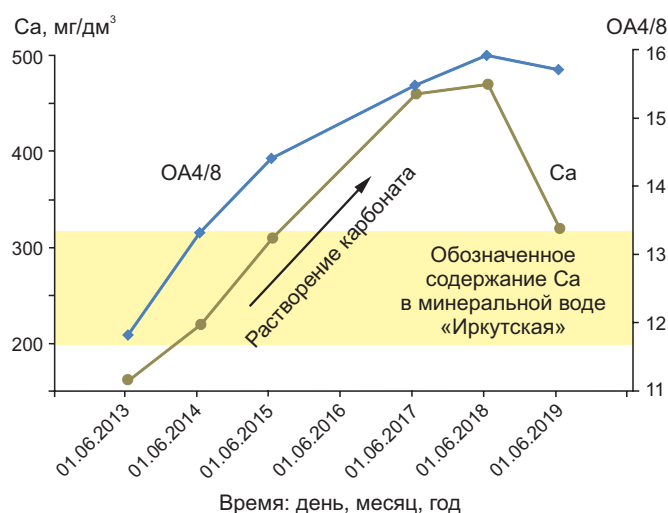


Рис. 12. Временные вариации ОА4/8 и содержания кальция в минеральной воде из Олхинской скважины.

Fig. 12. Temporal variations of ОА4/8 and calcium content in mineral water from the Olkha well.

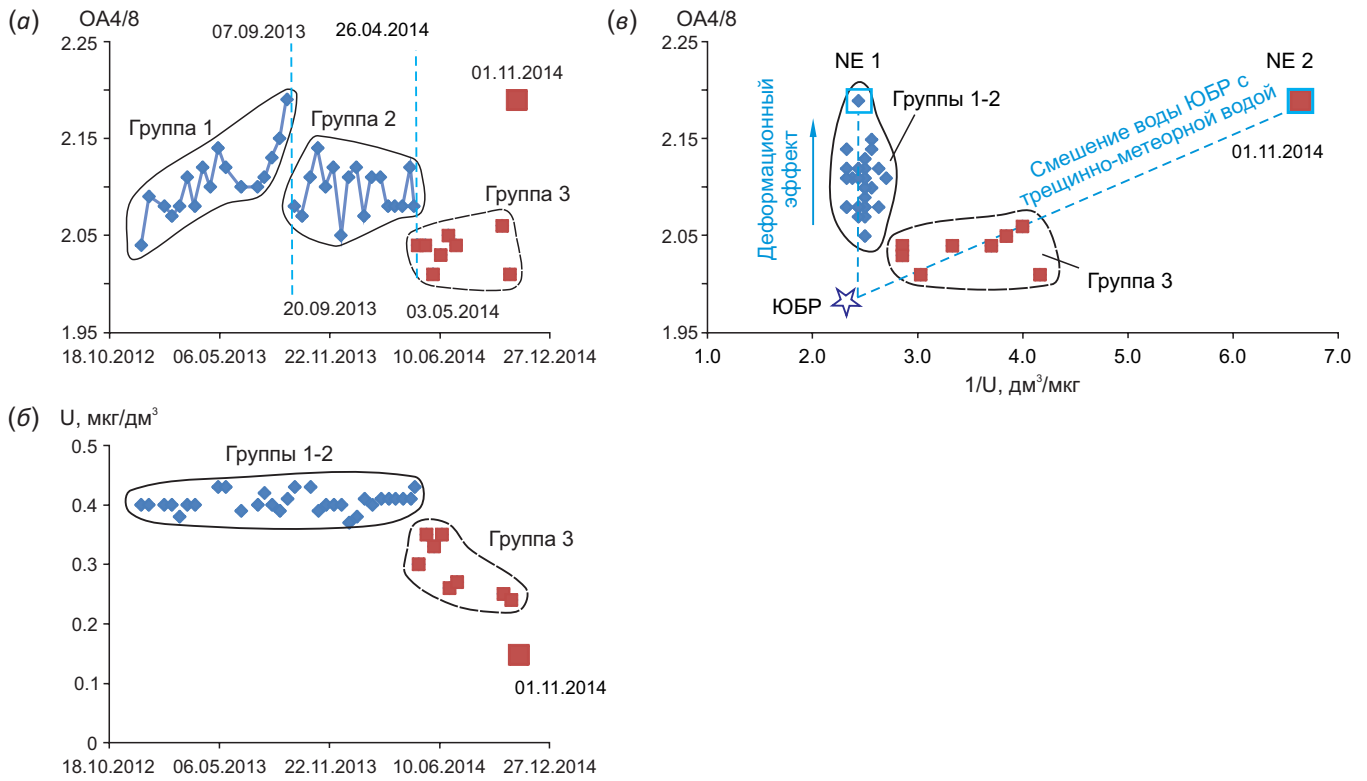


Рис. 13. Временные вариации OA4/8 (а), U (б) и соотношения OA4/8 – 1/U (в) в водах трех групп родника из зоны Радищево (ст. 1с).

Fig. 13. Temporal variations of OA4/8 (a), U (б), and OA4/8 vs 1/U (в) in the three groups of water samples from a spring in the Radishchevo zone (St. 1s).

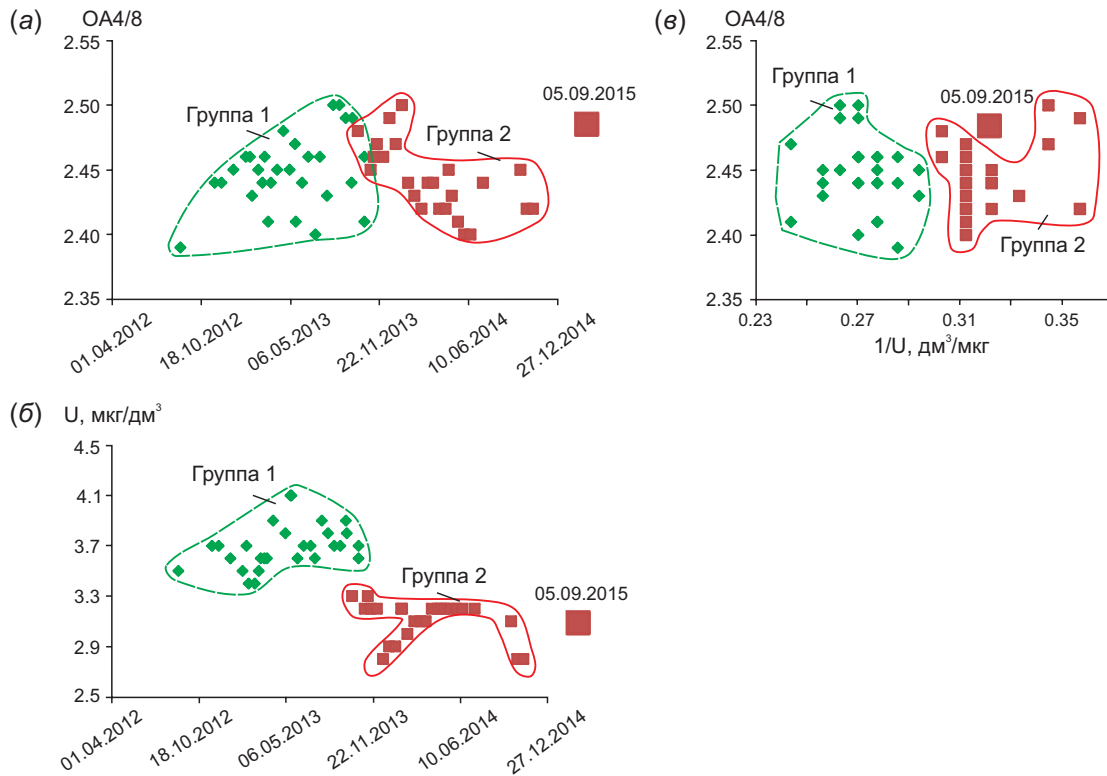


Рис. 14. Временные вариации OA4/8 (а), [U] (б) и соотношения OA4/8 – 1/U (в) в пробах вод двух групп родника 3с-24 Ангарской зоны.

Fig. 14. Temporal variations of OA4/8 (a), [U] (б), and OA4/8 vs 1/U (в) in the two groups of water samples from spring 3с-24 in the Angara zone.

[U] = 3.1 мкг/дм³, соответствующее интервалу [U] второй группы при значении OA4/8 = 2.48, близком к верхнему пределу. Этот мониторинг отразил смену подземных вод в активном Ангарском разломе со снижением [U], но без явного изменения OA4/8. Сравнивая результаты наблюдений родника 3с-24 (рис. 14) с результатами наблюдений по роднику 1с зоны Радищево (см. рис. 13), можно видеть сходные временные тенденции, выражающиеся в уменьшении роли компонента ЮБР (или в случае ст. 3с-24 производного от ЮБР компонента ОКБВ) относительно других компонентов, участвующих в смешении.

5.5. Смещение модифицированных компонентов Южно-Байкальского резервуара с компонентом подземных вод высокого OA4/8

Такой характер смешения проявлен в подземных водах Худяковской зоны (см. рис. 3). При группировании по времени отбора проб родника ст. Hud (рис. 15, а, б) в течение 11 месяцев 2014 г. первые три пробы, отобранные зимой и в начале весны (группа 1: 11.01.2014 г. – 10.03.2014 г.), дали тренд снижения OA4/8 от 5.47 до 5.15 при одном значении [U] (0.020–0.021 мкг/дм³). Пять последующих весенних проб (группа 2: 22.03.2014 г. – 17.05.2014 г.) показали возрастание OA4/8 от 4.78 до

5.33 с уменьшением [U] от 0.036 до 0.026 мкг/дм³. Две осенние пробы (группа 3: 04.10.2014 г. и 01.11.2014 г.) обозначили соответственно максимальное и минимальное значения OA4/8 = 5.54 и 4.28 при [U] = 0.024 и 0.010 мкг/дм³.

На диаграмме OA4/8 – 1/U (рис. 15, в) отобразились два тренда смешения сильно неравновесного компонента NE из эвапоритовых отложений неопротерозоя – нижнего кембрия с модифицированными компонентами Южно-Байкальского резервуара: группы 2 – с ОКБВ, групп 1 и 3 – с восстановленным компонентом, который, подобно ОКБВ, обнаруживает относительное понижение OA4/8. Если принять этот компонент как соответствующий ВКБВ, 1/U в таком гипотетическом компоненте должно достигать ~200. Модифицированный компонент байкальской воды существенно уступает компоненту воды из эвапоритовых отложений. Состав воды (OA4/8 = 2.20, [U] = 1.01 мкг/дм³), близкий к ОКБВ, определен в скважине водоснабжения дер. Худяково (ст. 123), дренирующей юрские песчаники.

Результаты этого мониторинга свидетельствуют о смене модифицированных компонентов ЮБР, играющих роль примесей для преобладающего (общего) компонента NE. В водах первой (зимне-весенней) группы компонент NE сочетался с небольшой примесью ВКБВ.

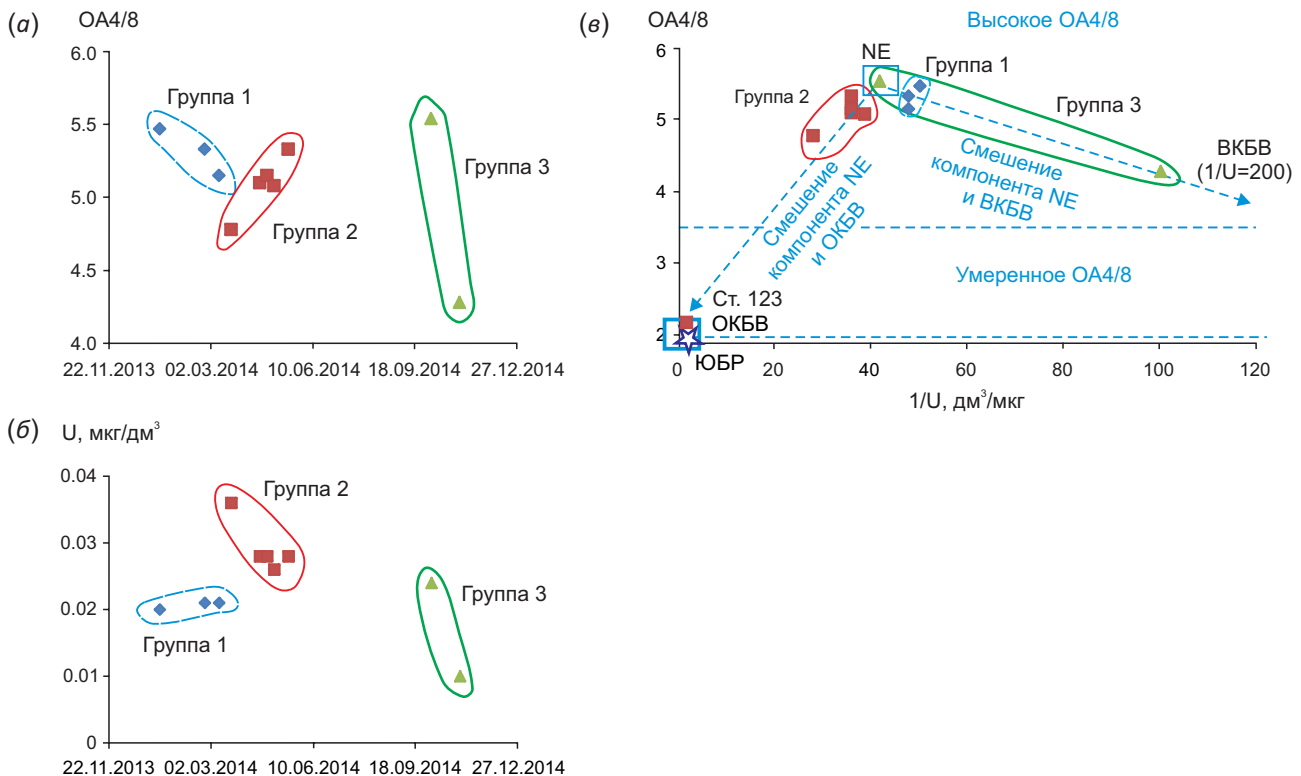


Рис. 15. Временные вариации OA4/8 (а), [U] (б) и диаграмма смешения OA4/8 – 1/U (в) трех серий проб воды родника Худяковской зоны (ст. Hud).

На диаграмме (в) дополнительно показан состав вод скважины дер. Худяково (ст. 123) и показаны тренды смешения (объяснения в тексте).

Fig. 15. Temporal variations of OA4/8 (a), and [U] (b), and the mixing diagram of OA4/8 vs 1/U (v) for the three series of water samples from a spring in the Khudyakovo zone (st. Hud).

Diagram (v): composition of water from Khudyakovo village (st. 123), and mixing trends (explanations in the text).

Последующий переход к весенней группе 2 обозначил усиление роли ОКБВ. В осенней группе 3 первая проба соответствовала компоненту NE, вторая – увеличению примеси ВКБВ.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована зональность в нарушении циклического равновесия изотопов урана в подземных водах на южном деформированном краю Сибирского палеоконтинента с выходом в Хамардабанский террейн, аккрецированный к палеоконтиненту в раннем палеозое. Определена роль воды из резервуара Южного Байкала как основного компонента подземных вод на побережье Байкала в участках распространения пологих разрывов Ангарского надвига и субвертикальных разрывов шовной зоны Главного Саянского разлома с современной сдвиговой компонентой, а также в активном Ангарском разломе и северо-восточном крыле этого разлома. Выделены тренды смещения компонентов подземных вод с разным $OA4/8$ и $[U]$ с участием напорных артезианских и метеорных вод.

Выделены гидрогеохимические 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 зонах: Олхинской (неопротерозойско-нижнекембрийские отложения, $OA4/8 = 3.58-15.92$), Худяковской (кембрийские отложения, перекрытые юрскими отложениями, $OA4/8 = 4.28-9.37$) и Голоуспенской (неопротерозойские отложения, $OA4/8 = 2.73-4.09$). Вторым эффектом проявлен в умеренном возрастании $OA4/8$ пресных вод из активных разломов, пересекающих породы пяти зон: Ангарской и Радищево (юрские и плиоцен-четвертичные отложения, $OA4/8 = 2.07-2.50$ и $1.99-2.21$, соответственно), Большекотловской 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, $OA4/8 = 1.06-3.29$).

Определены зоны слабого нарушения циклического равновесия изотопов урана подземных вод – неактивные в деформационном отношении территории раннего докембрия Шарыжалгайского блока (Ангасольская, $OA4/8 = 1.35-1.51$, и Ливинская, $OA4/8 = 1.06-1.98$), Академическая (юрские отложения, $OA4/8 = 1.38-1.73$) и Хамардабанская (метаморфические породы аккрецированного террейна, $OA4/8 = 1.23-1.45$). В Ливинской, Большекотловской, 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 понизилось (до 15.71). Содержание Са соответственно 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 песчаников 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 последовательно снижались концентрации изотопа ²³⁴U, при минимальных значениях которого случилось Голоуспенское землетрясение с магнитудой 4.7.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Статья подготовлена в рамках госзадания по проекту ИЗК СО РАН № 0346-2019-0005. Работа поддержана Правительством Российской Федерации грантом на реализацию крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (Постановление Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2019 г. № 1902), проект «Основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической ситуации на Байкальской природной территории» (№ 2020-1902-01-071).

Прецизионные измерения $OA4/8$ и $[U]$ выполнялись Е.П. Чебыкиным, А.М. Ильясовой и А.П. Чебыкиным методом ICP-MS с подготовкой проб в лаборатории изотопии и геохронологии (ИЗК СО РАН) и с измерениями на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 се в центре коллективного пользования «Ультрамикрoанализ» (ЛИН СО РАН). Постановка задачи исследований и подготовка статьи осуществлялась С.В. Рассказовым, Е.П. Чебыкиным, А.М. Ильясовой и И.С. Чувашовой. Остальные соавторы работы проводили опробование и принимали участие в обсуждении результатов. Авторы благодарят П.С. Бадминова и И.Г. Крюкову за помощь в опробовании воды оз. Байкал. Авторы благодарят двух анонимных рецензентов за конструктивные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Alekseeva L.P., Alekseev C.V., 2019. Geochemistry of Underground Ice, Salt Water and Brines of Western Yakutia. GEO, Novosibirsk, 214 p. (in Russian) [Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов Западной Якутии. Новосибирск: ГЕО, 2019. 214 с.]. <https://doi.org/10.21782/B978-5-6043021-2-5>.
- Chabaux F., Bourdon B., Riotte J., 2008. U-Series Geochemistry in Weathering Profiles, River Waters and Lakes. Radioactivity in the Environment 13, 49–104. [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(07\)00003-4](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(07)00003-4).
- Chabaux F., Granet M., Larqué Ph., Riotte J., Skliarov E.V., Skliarova O., Alexeieva L., Risacher F., 2011. Geochemical and Isotopic (Sr, U) Variations of Lake Waters in the Ol'khon Region, Siberia, Russia: Origin and Paleoenvironmental

Implications. *Comptes Rendus Geoscience* 343 (7), 462–470. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2011.07.004>.

Chalov P.I., 1975. Isotopic Fractionation of Natural Uranium. *Ilim, Frunze*, 236 p. (in Russian) [Чалов П.И. Изотопное фракционирование природного урана. Фрунзе: Илим, 1975. 236 с.].

Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., 2015. The First Results of Monitoring $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ in Water from Active Faults of the Western Coast of Southern Baikal. *Doklady Earth Sciences* 460, 464–467. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15020075>.

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Khodzher T.V., Grachev M.A., 2018. Seasonal Variability of Major and Trace Elements and the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Ratio in the Selenga River – Main Tributary of Lake Baikal (Russian Part of the River). In: P. Vossen, D. Karthe, B. Gunsmaa, S. Enkhjargal (Eds), *Book of Abstracts GMIT Symposium on Environmental Science and Engineering*. GMIT, Nalaikh, 64–65.

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A., 2012. Current State of Waters of the Selenga River in the Territory of Russia According to the Main Components and Trace Elements. *Chemistry in the Interests of Sustainable Development* 20, 613–631 (in Russian) [Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачев М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. С. 613–631].

Cherdyntsev V.V., 1969. *Uranium-234*. Atomizdat Press, Moscow, 308 p. (in Russian) [Чердынцев В.В. Уран-234. М.: Атомиздат, 1969. 308 с.].

Cherdyntsev V.V., 1973. *Nuclear Volcanology*. Nauka, Moscow, 208 p. (in Russian) [Чердынцев В.В. Ядерная вулканология. М.: Наука, 1973. 208 с.].

Chipizubov A.V., Smekalin O.P., 1999. Paleoseismodislocations and Related Paleoequakes at the Main Sayan Fault Zone. *Geology and Geophysics* 40 (6), 936–947 (in Russian) [Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 6. С. 936–947].

Danilovich V.N., 1949. New Data on the Angarsk Thrust. *Bulletin of the Academy of Sciences. Geology Series* 4, 69–77 (in Russian) [Данилович В.Н. Новые данные об Ангарском надвиге // Известия Академии наук. Серия геологическая. 1949. № 4. С. 69–77].

Danilovich V.N., 1963. Arkogenic Type of Thrusts. *Geology and Geophysics* 2, 3–11 (in Russian) [Данилович В.Н. Аркогенный тип надвигов // Геология и геофизика. 1963. № 2. С. 3–11].

Edgington D.N., Robbins J.A., Colman S.M., Orlandini K.A., Gustin M.-P., 1996. Uranium-Series Disequilibrium, Sedimentation, Diatom Frustules and Paleoclimate Change in Lake Baikal. *Earth and Planetary Science Letters* 142 (1–2), 29–42. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00085-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00085-4).

Finkel R.C., 1981. Uranium Concentrations and $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Activity Ratios in Fault-Associated Groundwater as Possible Earthquake Precursors. *Geophysical Research Letters* 8 (5), 453–456. <https://doi.org/10.1029/GL008i005p00453>.

Grudin M.I., Chuvashova I.S. (Eds), 2011. *Baikal. Geology. Human Being*. ISU Publishing House, Irkutsk, 239 p. (in Russian) [Байкал. Геология. Человек / Ред. М.И. Грудин, И.С. Чувашова. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. 239 с.].

Logatchev N.A., Zorin Yu.A., 1992. *Baikal Rift Zone: Structure and Geodynamics*. *Tectonophysics* 208, 273–286.

Odintsova M.M., Gutova L.N., Bogdasheva L.I., 1967. *Stratigraphy*. In: *Jurassic Continental Sediments in the Southern Siberian Platform*. Nauka, Moscow, 19–118 (in Russian) [Одинцова М.М., Гутова Л.Н., Богдашева Л.И. Стратиграфия // Юрские континентальные отложения на юге Сибирской платформы. М.: Наука, 1967. С. 19–118].

Pampura V.D., Sandimirov I.V., Gapon A.E., Chernaya L.I., Ulybusheva E.I., 1996. Distribution and Isotopic Composition of Uranium in the Calculated Runoff and Water of Lake Baikal. *Reports of the Academy of Sciences* 350 (6), 672–676. (in Russian) [Пампура В.Д., Сандимиров И.В., Гапон А.Е., Черная Л.И., Улыбушева Е.И. Распределение и изотопный состав урана в расчетном стоке и воде озера Байкал // Доклады АН. 1996. Т. 350. № 6. С. 672–676].

Pinneker E.V., Pisarsky B.I., Lomonosov I.S., Koldysheva R.Ya., Didenko A.A., Sherman S.I., 1968. *Hydrogeology of the Baikal region*. Nauka, Moscow, 170 p. (in Russian) [Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С., Колдышева Р.Я., Диденко А.А., Шерман С.И. Гидрогеология Прибайкалья. Москва: Наука, 1968. 170 с.].

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Badminov P.S., Orgilyanov A.I., Kryukova I.G., Ageev A.O., 2015a. Concentrations and Isotopic Composition of Uranium and Strontium in Water of Lake Baikal. In: *Geological Evolution of Water–Rock Interaction. Proceedings of Second All-Russia Scientific Conference with International Participation (September 06–11, 2015)*. Dal'nauka, Vladivostok, 397–399 (in Russian) [Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Бадминов П.С., Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Агеев А.О. Концентрации и изотопный состав урана и стронция в воде оз. Байкал // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы второй Всероссийской научной конференции с международным участием (06–11 сентября 2015 г.). Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 397–399].

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A., 2015b. Creating the Kultuk Polygon for Earthquake Prediction: Variations of ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Groundwater from Active Faults at the Western Shore of Lake Baikal. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (4), 519–553 (in Russian) [Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в подземных водах из активных разломов западного побережья

Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 4. С. 519–554]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0192>.

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Chebykin E.P., 2018. The $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Variations in Groundwater from the Mondy Area in Response to Earthquakes at the Termination of the Tunka Valley in the Baikal Rift System. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (4), 1217–1234 (in Russian) [Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Чебыкин Е.П. Вариации $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в подземных водах Мондинского полигона как отклики землетрясений на окончании Тункинской долины в Байкальской рифтовой системе. *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 4. С. 1217–1234]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0392>.

Salnikova E.B., Sergeev S.A., Kotov A.B., Yakovleva S.Z., Steiger R.H., Reznitskiy L.Z., Vasil'ev E.P., 1998. U–Pb Zircon Dating of Granulite Metamorphism in the Sludyanskiy Complex, Eastern Siberia. *Gondwana Research* 1 (2), 195–205. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70830-3](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70830-3).

Seminsky K.Zh., Gladkov A.S., Lunina O.V., 2001. Tectonophysical Characteristics of the Angarsk Fault Zone (South of the Siberian Platform). *Geology and Geophysics* 42 (8), 1252–1262 (in Russian) [Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В. Тектонофизическая характеристика зоны Ангарского разлома (юг Сибирской платформы) // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 8. С. 1252–1262].

Seminsky K.Zh., Radziminovich Y.B., 2007. Seismicity of the South of the Siberian Platform: Spatio-Temporal Characteristics and Genesis. *Physics of the Earth* 9, 18–30 (in Russian) [Семинский К.Ж., Радзиминович Я.Б. Сейсмичность юга Сибирской платформы: пространственно-временная характеристика и генезис // Физика Земли. 2007. № 9. С. 18–30].

Skoblo V.M., Lyamina N.A., Rudnev A.F., Luzina I.V., 2001. Continental Upper Mesozoic of the Pribaikalie and Transbaikalia. SB RAS Publisher, Novosibirsk, 332 p. (in Russian) [Скобло В.М., Лямина Н.А., Руднев А.Ф., Лузина И.В. Континентальный верхний мезозой Прибайкалья и Забайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 332 с.].

Suvorov V.D., Mishen'kina Z.R., 2005. Structure of Sedimentary Deposits and Basement under the Southern Basin of Lake Baikal According to Correlated Seismic Refraction

Data. *Geology and Geophysics* 46 (11), 1159–1167 (in Russian) [Суворов В.Д., Мишенькина З.Р. Структура осадочных отложений и фундамента под Южной котловиной озера Байкал по данным КМПВ // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1159–1167].

Tokarev I., Zubkov A.A., Rumynin V.G., Polyakov V.A., Kuznetsov V.Yu., Maksimov F.E., 2006. Origin of High $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Ratio in Post-Permafrost Aquifers. In: B.J. Merkel, A. Hascheberger (Eds), *Uranium in the Environment. Mining Impact and Consequences*. Springer, Berlin, Heidelberg, 847–856. https://doi.org/10.1007/3-540-28367-6_88.

Ulomov V.I., Bogdanov M.I., 2016. Set of General Seismic Zoning Maps for the Territory of the Russian Federation, OSR-2016 (in Russian) [Уломов В.И., Богданов М.И. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016].

Votintsev K.K., 1961. Hydrochemistry of Lake Baikal. Proceedings of the Baikal Limnological Station, USSR Academy of Sciences 20, 311 p. (in Russian) [Вотинцев К.К. Гидрохимия озера Байкал // Труды Байкальской лимнологической станции АН СССР. 1961. Т. 20. 311 с.].

Yamamoto M., Sato T., Sasaki K., Nama K., Nakamura T., Komura K., 2003. Anomalously High $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ Activity Ratios of Tatsunokuchi Hot Spring Waters, Ishikawa Prefecture, Japan. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 255 (2), 369–373. <https://doi.org/10.1023/a:1022573208205>.

Zamaraev S.M., Sizykh V.I., Meshalkin S.I., Novokshonov Yu.A., 1983. Structural Features of the Angarsk Thrust. *Geology and Geophysics* 5, 126–129 (in Russian) [Замараев С.М., Сизых В.И., Мешалкин С.И., Новокшенов Ю.А. Особенности строения Ангарского надвига // Геология и геофизика. 1983. № 5. С. 126–129].

Zverev V.L., Dolidze N.I., Spiridonov A.I., Cheshko A.L., Chkhenkeli Sh.M., 1975. Anomaly of the Even Uranium Isotopes in the Groundwater of Seismically Active Regions of Georgia. *Geochemistry* 11, 1720–1724 (in Russian) [Зверев В.Л., Долидзе Н.И., Спиридонов А.И., Чешко А.Л., Чхенкели Ш.М. Аномалия четных изотопов урана в подземных водах сейсмоактивных районов Грузии // Геохимия. 1975. № 11. С. 1720–1724].