Гидрогеология, инженерная геология

УДК 550.844+546.791.027+632.126 https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.2.151

Временные изменения ²³⁴U/²³⁸U, ²³⁴U и концентраций элементов в минеральной воде из карбонатов в Олхинской скважине, юг Сибирской платформы: Условия проявления эффекта Чердынцева-Чалова

С.В. Рассказов^{1,2}, А.М. Ильясова¹, Е.П. Чебыкин^{1,3}

Аннотация. По результатам мониторинга 2013-2022 гг. определяются изменяющиеся во времени соотношения компонентов минеральной воды из карбонатов, содержащих гипс и ангидрит при смене отношения активностей 234 U/ 238 U (OA4/8) от 11.82 до 15.71. С повышением этого показателя в минеральной воде возрастает также активность 234 U (A4) с проявлением в 2017-2022 гг. максимумов и минимумов. Вариации A4 согласуются с изменением общей минерализации, содержаний всех макрокомпонентов (Ca, Na, Mg, Si, K, S и Cl) и части микрокомпонентов (U, Li, B, V, Mn, Br, Y, Rb и Sr) при обратном соотношении с концентрациями другой части микрокомпонентов (Cu, Sc, Nb, Mo, Ba, Ti, Zr и Cr). Делается вывод о том, что изотопы U варьируются в минеральной воде вследствие изменения химического растворения карбонатов. Минеральная вода обогащается атомами отдачи 234 U подобно другим растворяющимся компонентам, тогда как OA4/8 осложняется зависимостью растворения U от окислительно-восстановительного потенциала (ОВП).

Ключевые слова: подземные воды, $^{234}U/^{238}U$, уран, карбонат, гипс, ангидрит, Сибирская платформа.

Temporal Changes of ²³⁴U/²³⁸U, ²³⁴U, and Element Concentrations in Mineral Water from Carbonates in the Olkha Well, Southern Siberian Platform: Conditions for Displaying Cherdyntsev-Chalov effect

S.V. Rasskazov^{1,2}, A.M. Ilyasova¹, E.P. Chebykin^{1,3}

Abstract. Based on monitoring results of 2013–2022, the time-varying ratios of components in mineral water from carbonates containing gypsum and anhydrite are determined, when the activities ratios ²³⁴U/²³⁸U (*AR4/8*) vary from 11.82 to 15.71. With increasing this indicator, the activity of ²³⁴U (*A4*) also increases in mineral water, with maxima and minima occurring in 2017–2022. Variations in *A4* are consistent with changes in total mineralization, the contents of all macrocomponents (Ca, Na, Mg, Si, K, S, and Cl), and some microcomponents (U, Li, B, V, Mn, Br, Y, Rb, and Sr), with an inverse trends of the other microcomponents (Cu, Sc, Nb, Mo, Ba, Ti, Zr, and Cr). It is inferred that U isotopes vary in mineral water due to changes in the chemical dissolution of carbonates. Mineral water is

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

³Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

¹Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

²Irkutsk State University, Russian Federation

³Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

enriched in ²³⁴U recoil atoms like other dissolving components, whereas *OA4/8* is complicated by the dependence of U dissolution on oxidation-reduction potential (ORP).

Keywords: groundwater, Baikal, ²³⁴U/²³⁸U, uranium, active fault, evaporate.

Введение

В лабораторных условиях соблюдается циклическое равновесие отношения активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (*OA4/8*) \approx 1, соответствующее атомному отношению $\approx 5.47 \times 10^{-5}$. В природе равновесие нередко нарушается. Получаются значения ОА4/8 геологических объектов десятки и сотни единиц (Tokarev et al., 2006). Циклическое равновесие может быть нарушено по разным причинам. Эффект, вызванный деформацией пород в активном разломе и, как следствие, реализующийся в избыточной отдаче ²³⁴U в воду, циркулирующую через горные породы и минералы, был продемонстрирован В.В. Чердынцевым и П.И. Чаловым (Чердынцев, 1969, 1973; Чалов, 1975). Эффект Чердынцева-Чалова неоднократно регистрировался в откликах ОА4/8 подземных вод на сейсмические события. В подземных водах Грузии отмечалось 10-кратное косейсмическое возрастание OA4/8 (Zverev et al., 1975).

Избыточное образование атомов отдачи 234 U (избыточной активности 234 U, A4) получает различные интерпретации. При этом гипотезы о природе возрастания OA4/8 основываются на разных подходах к его изучению (Киселев, Зыков, 2013; Яковлев и др., 2016; Kiselev et al., 2017; Timashev, 2018).

Настоящее исследование учитывает распространенное явление изменения изотопного эффекта U в природных подземных водах с течением времени. Так, в горячем источнике Японии Татсунокучи (Tatsunokuchi) определен интервал варьирующихся во времени значений OA4/8 от 2.7 до 51 (Yamamoto et al., 2003). В горячих водах источника

города Ниланд, США наблюдения продолжались 1.5 года и выявили изменения *OA4/8*, предшествовавшие сильному сейсмическому событию. *OA4/8* возросло от 2.6 до 4.5 в течение года с понижением концентрации урана от 0.0130 до 0.0055 мкг/дм³. Через 11 дней после сильного толчка *OA4/8* понизилось трехкратно (до 1.5) при шестикратном повышении концентрации U (до 0.044 мкг/дм³) (Finkel, 1981).

В подземных водах активных разломов Тункинской долины Байкальской рифтовой зоны были определены повышенные значения OA4/8. В результате мониторинга на сейсмопрогностических 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 (Рассказов и др., 2018).

В подземных водах осадочного чехла Сибирской платформы определены значения *ОА4/8*, изменяющиеся от почти равновесного (близкого к 1) до 15.9. Наиболее высокое отношение получено в минеральной воде скважины, которая находится между Иркутском и Слюдянкой, вблизи ж-д станции Олха (рис. 1).

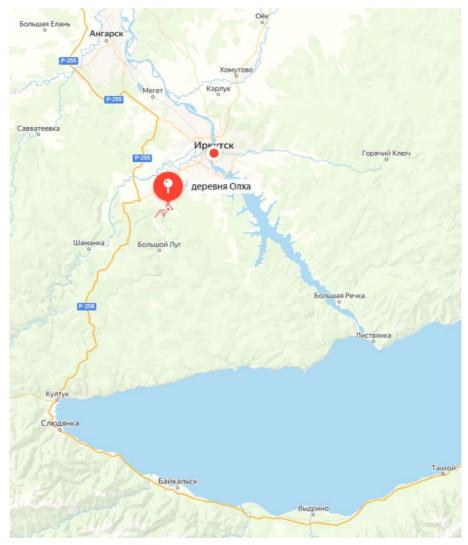


Рис. 1. Местоположение Олхинской скважины.

Fig. 1. Location of the Olkha well.

Минеральная вода извлекается здесь скважиной глубиной 352 м из нижнекембрийских карбонатных отложений с гипсом и ангидритом. Ежегодное опробование этой скважины проводится в середине - второй половине июня. С июня 2013 г. до июня 2018 г. было выявлено последовательное возрастание значений отношения изотопов U на 4.1 единицы отношения активностей (Рассказов и др., 2020). В настоящей статье используется ряд наблюдений, продолжающийся до 2022 г. Цель статьи – использовать полученные мониторинговые данные для выяснения причин вариаций ОА4/8 и А4 с параллельным отслеживанием временных изменений микро и макрокомпонентов минеральной воды.

Отбор, хранение и аналитические исследования проб воды

При отборе проб для определения химического элементного состава образцы воды фильтруются через шприц-насадки с диаметром пор 0.45 мкм (Minisart 16555-K, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech Gmbh, Германия) в предварительно взвешенные 2 мл полипропиленовые пробирки Эппендорфа (Ахудеп Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта используется концентрированная азотная кислота (70 %), дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), в

которую добавляется индий (типично 1000 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Аликвоты консерванта взвешиваются при добавлении в пробирки. Пробирки с отобранными образцами воды взвешиваются и рассчитывается точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). Пробы хранятся в холодильнике при положительной температуре. В подготовленных растворах определяется содержание 72 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСПР-МС) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 (Чебыкин и др., 2012).

Изотопы U определяются после его выделения на ионно-обменной колонке из отдельной пробы воды (до 400 мл). Применяется разработанная аналитическая методика (Чебыкин и др., 2007, 2015).

Временные ряды ОА4/8, А4 и концентрации U

Временные вариации *OA4/8* минеральной воды Олхинской скважины характеризуются

плавной восхолящей линией. В 20.06.2013 определяется наиболее низкое 11.82, в пробах значение 16.06.2014, 27.06.2015, 11.06.2017 и 13.06.2018 получается возрастающий ряд значений, соответственно, 13.32, 14.41, 15.48 и 15.92. В 2013-2015 гг. значения OA4/8 возрастают круго (отрезок I) и затем, в 2015-2018 гг., сменяются более пологим возрастанием (отрезок II). После точки перегиба 2018 г. на максимуме образуется плавно нисходящий отрезок пробах значений OA4/8В 13.06.2019, 08.07.2020 и 21.06.2021, соответственно, 15.71, 15.50 и 15.19 (отрезок III). После точки перегиба 2021 г. на минимуме в пробе 21.06.2022 вновь наблюдается возрастание *OA4/8* до 15.66 (отрезок IV). Таким образом, ряд наблюдений разделяется на 4 отрезка по 3-4 года: 2013-2015 гг., 2015-2018 гг., 2018-2021 гг. и 2021-2022 гг. В последнем отрезке обозначается начальная тенденция изменения ОА4/8 (рис. 2а).

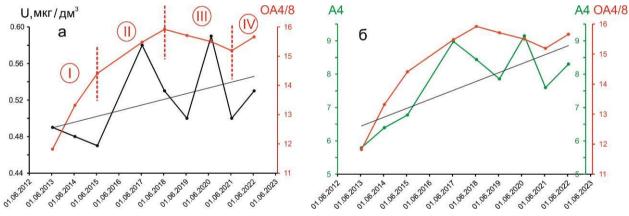


Рис. 2. Временные вариации OA4/8 и содержания U (*a*) и OA4/8 и A4 (*б*), возрастающих с течением времени в минеральной воде из Олхинской скважины.

Fig. 2. Temporal variations of *AR4/8*, U content (*a*), and *AR4/8*, *A4*, temporally increasing in mineral water from Olkha well.

Концентрация U с течением времени меняется независимо от изменения OA4/8. В начале ряда наблюдений определяется концентрация $U = 0.47-0.50 \text{ мкг/дм}^3$ при ее относительном возрастании в 2017 и 2020 гг. до 0.58 мкг/дм^3 (рис. 2a).

Концентрация дочернего изотопа 234 U (A4) также возрастает, но линия его концентрации имеет ломаный характер. Вариация явно отличается от плавной линии OA4/8 (рис. 26). Начальное значение A4 = 5.8 (20.06.2013)

сменяется максимумами 9.0 (11.06.2017) и 9.1 (08.07.2020).

Результирующее отношение активностей 4/8 урана складывается из двух составляющих: U и ²³⁴U. Возникает вопрос – с каким из изотопных параметров урана коррелируются макро- и микрокомпоненты минеральной воды?

Макрокомпоненты

На графиках рис. 3 проводится сопоставление рядов ОА4/8 и А4 (соответственно, линии и шкалы красного и зеленого цвета) с рядами макрокомпонентов. В пробе воды, отобранной 20.06.2013, общая минерализация (OM) составляет 1.5 г/дм³, а в ежегодных пробах ОМ линейно возрастает к 2017 г. до 3.8 г/дм³. В 2018 г. темп возрастания ОМ сни-жается на значение 3.9 г/дм³. Этот интервал наблюдений относится к двум первым отрезкам устойчивого возрастания ОА4/8. В 2019 г. ОМ резко снижается до 2.4 $\Gamma/дм^3$, в 2020 г. возрастает до 3.9 $\Gamma/дм^3$ и в 2021 г. вновь снижается до 2.7 г/дм³. Резко колеблющиеся значения ОМ вписываются временной отрезок OA4/8. во Ш Относительное возрастание ОМ в 2022 г. до 3.1 г/дм³ сопровождается относительным повышением ОА4/8 на временном отрезке IV (рис. 3a).

Конфигурация линии содержания Са повторяет конфигурацию линии ОМ. В пробе воды, отобранной 20.06.2013, содержится 162 мг/дм³ Са, а в ежегодных пробах содержание Са последовательно возрастает к 2017–2018 гг. до 470 мг/дм³. В 2019 г. содержание Са в воде резко снижается до 320 мг/дм³, в 2020 г. возрастает до 440 мг/дм³ и в 2021 г. вновь снижается до 330 мг/дм³. Относительное возрастание содержания Са в 2022 г. до 370 мг/дм³ сопровождается относительным повышением *OA4/8* на временном отрезке IV (рис. 36).

Конфигурация линии содержания Мд также повторяет конфигурацию линии ОМ. В пробе воды, отобранной 20.06.2013, содержится 61 мг/дм³ Mg, а в ежегодных пробах содержание Мд последовательно возрастает к 2017 г. до 139 мг/дм 3 . В 2018 г. содержание Мд в минеральной воде снижается до 135 $M\Gamma/дM^3$, а в 2019 г. снижается резче – до 97 $M\Gamma/дM^3$, в 2020 г. возрастает до 143 $M\Gamma/дM^3$ и в 2021 г. вновь снижается до 110 мг/дм 3 . Относительное возрастание содержания Мд в 2022 г. до 124 мг/дм³ сопровождается относительным повышением OA4/8 временном отрезке IV (рис. 3г).

Конфигурация линии содержания К повторяет конфигурацию линии ОМ. В пробе воды, отобранной 20.06.2013, содержится $2.10 \text{ мг/дм}^3 \text{ K}$, а в ежегодных пробах содержание К последовательно возрастает к 2017–2018 гг. до 5.7– $5.8 \text{ мг/дм}^3 \text{. В } 2019 \text{ г. содержание К в воде резко снижается до <math>3.7 \text{ мг/дм}^3 \text{, в} 2020 \text{ г. возрастает до } 5.6 \text{ мг/дм}^3 \text{ и в } 2021 \text{ г. вновь снижается до } 4.0 \text{ мг/дм}^3 \text{. Относительное возрастание содержания К в } 2022 \text{ г. до } 4.6 \text{ мг/дм}^3 \text{ сопровождается относительным повышением } OA4/8 \text{ на временном отрезке IV (рис. 3e).}$

Конфигурация линии содержания S подобна конфигурации линии OM. В пробе воды, отобранной 20.06.2013, содержится 43 мг/дм 3 S, а в ежегодных пробах содержание S последовательно возрастает к 2017–2018 гг. до 480–510 мг/дм 3 . В 2019 г. содержание S в воде резко снижается до 370 мг/дм 3 , в 2020 г. возрастает до 540 мг/дм 3 и в 2021 г. вновь снижается до 390 мг/дм 3 . Относительное возрастание содержания S в 2022 г. до 430 мг/дм 3 сопровождается относительным повышением OA4/8 на временном отрезке IV (рис. 3ж).

Согласованное возрастание *OA4/8*, ОМ и содержаний Ca, Na, Mg, K, S наблюдается на временных отрезках I и II, в 2013–2017 гг. При выходе на максимум *OA4/8* в июне 2018 г. тренд начинает нарушаться и весь отрезок III становится неустойчивым.

Временные вариации макрокомпонентов Si и Cl имеют особенности в начале ряда наблюдений. Cl остается низким в 2013–2015 гг. (290–400 мг/дм³) и резко возрастает в 2017–2018 гг. (860–950 мг/дм³) (рис. 33). Si обнаруживает аномально низкое содержание (3.4 мг/дм³) в 2015 г. (рис. 3д).

Вариации ОМ, а также Са, Na, K, Mg, S согласуются между собой и лишь частично — с вариациями OA4/8, а с течением времени теряют согласованность с этим изотопным параметром. Минимумы и максимумы ОМ, а также частных макрокомпонентов повторяют минимумы и максимумы A4.

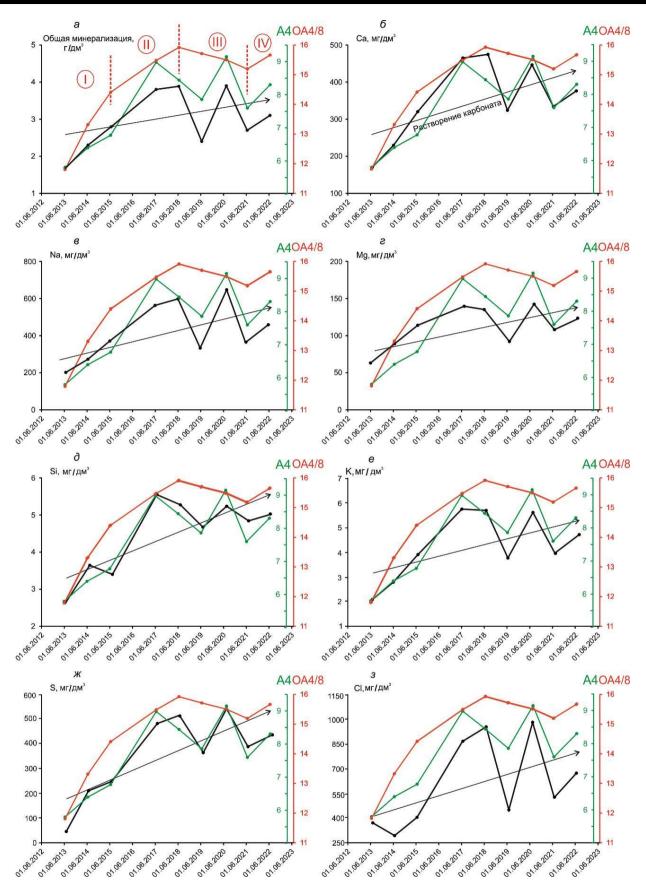


Рис. 3. Временные вариации OA4/8, A4 и содержаний макрокомпонентов в минеральной воде из Олхинской скважины.

Fig. 3. Temporal variations of *OA4/8*, *A4*, and major components in mineral water from Olkha well.

Микрокомпоненты

Временному изменению ОМ соответствует изменение концентрации микрокомпонентов Li, B, Rb и Sr. Вариации этих микрокомпонентов согласуются между собой и лишь частично — с вариациями OA4/8, а с течением времени теряют согласованность. Однако эти микрокомпоненты повторяют минимумы и максимумы A4.

В пробе воды, отобранной 20.06.2013, содержится 51 мкг/дм³ Li, а в ежегодных пробах содержание Li последовательно возрастает к 2018 г. до 175 мкг/дм³. В 2019 г. содержание Li в воде резко снижается до 94 мкг/дм³, в 2020 г. возрастает до 142 мкг/дм³ и в 2021 г. вновь снижается до 104 мкг/дм³. Относительное возрастание содержания Li в 2022 г. до 110 мкг/дм³ сопровождается относительным повышением ОА4/8 на временном отрезке IV (рис. 4а).

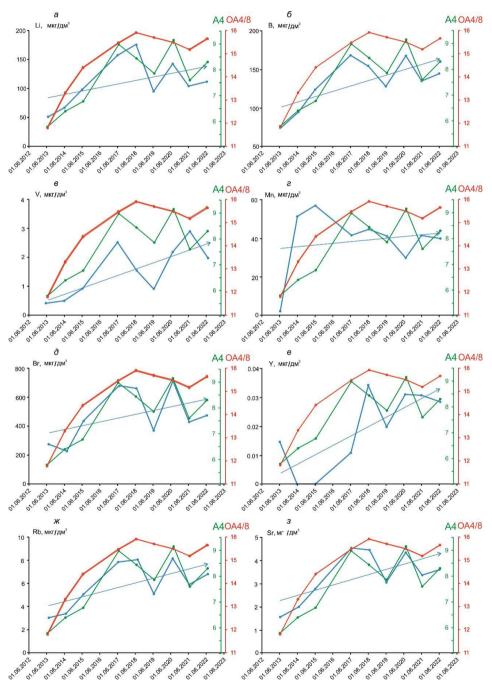


Рис. 4. Временные вариации OA4/8, A4 и содержаний микрокомпонентов, возрастающих с течением времени в минеральной воде из Олхинской скважины.

Fig. 4. Temporal variations of *AR4/8*, *A4*, and trace components temporally increasing in mineral water from Olkha well.

В пробе воды, отобранной 20.06.2013, содержится 75 мкг/дм³ В, а в ежегодных пробах содержание В последовательно возрастает к 2018 г. до 155–171 мкг/дм³. В 2019 г. содержание В в воде снижается до 130 мкг/дм³, в 2020 г. возрастает до 168 мкг/дм³ и в 2021 г. вновь снижается до 137 мкг/дм³. Относительное возрастание содержания В в 2022 г. до 145 мкг/дм³ сопровождается относительным повышением OA4/8 на временном отрезке IV (рис. 4б).

В пробе воды, отобранной 20.06.2013, содержится 3.1 мкг/дм³ Rb, а в ежегодных пробах содержание Rb последовательно возрастает к 2017–2018 г. до 7.9–8.0 мкг/дм³. В 2019 г. содержание Rb в воде снижается до 5.3 мкг/дм³, в 2020 г. возрастает до 8.1 мкг/дм³ и в 2021 г. вновь снижается до 6.0 мкг/дм³. Относительное возрастание содержания Rb в 2022 г. до 6.8 мкг/дм³ сопровождается относительным повышением OA4/8 на временном отрезке IV (рис. 4ж).

В пробе воды, отобранной 20.06.2013, содержится 1540 мкг/дм³ Sr, а в ежегодных июньских пробах содержание Sr последовательно возрастает к 2018 г. до 4500–4600 мкг/дм³. В 2019 г. содержание Sr в воде снижается до 3100 мкг/дм³, в 2020 г. возрастает до 4400 мкг/дм³ и в 2021 г. вновь снижается до 3400 мкг/дм³. Относительное возрастание содержания Sr в 2022 г. до 3600 мкг/дм³ сопровождается относительным повышением OA4/8 на временном отрезке IV (рис. 43).

Возрастающие с течением времени значения концентраций с более сложными вариациями, особенно в начале мониторингового ряда, наблюдаются для микрокомпонентов Br, Y, V и Mn.

В пробах воды, отобранных в 2013–2014 гг., содержится 230–280 мкг/дм³ Вг. В последующих пробах содержание Вг возрастает к 2017–2018 г. до 660–680 мкг/дм³. В 2019 г. содержание Вг в воде резко снижается до 370 мкг/дм³, в 2020 г. возрастает до 710 мкг/дм³ и в 2021 г. вновь снижается до 430 мкг/дм³. Относительное возрастание содержания Вг в 2022 г. до 470 мкг/дм³ сопровождается относительным повышением OA4/8 на временном отрезке IV OA4/8 (рис. 4д).

В пробе воды, отобранной 20.06.2013, содержится 0.015 мкг/дм³ Y. В следующие два года его концентрация снижается до значений 0.0002-0.0003 мкг/дм³, а 11.06.2017 содержание Y возрастает до 0.011 мкг/дм³, а в 2018 гг. выходит на максимум 0.034 мкг/дм³. В 2019 г. содержание Y в воде снижается до 0.02 мкг/дм³, в 2020 г. возрастает до 0.031 мкг/дм³ и в 2021 г. остается на этом же уровне. В 2022 г., на временном отрезке IV OA4/8, концентрация Y несколько снижается (рис. 4e).

Распределение ванадия во времени описывает синусоиду (рис. 4в). Для марганца низкая концентрация (1.82 мкг/дм³) определяется только в начале ряда, в 2013 г. В 2014—2015 гг. концентрация этого элемента наиболее высокая (51–57 мкг/дм³) и в последующие годы снижается до интервала 30–44 мкг/дм³. Фактически большая часть мониторингового ряда Мп образует нисходящий тренд (рис. 4г).

Группа микрокомпонентов Cu, Sc, Nb, Mo, Ba, Ti, Zr и Cr обозначает общее снижение концентраций с течением времени (рис. 5). Определяется также подобное временное снижение гидрокарбоната (HCO3⁻) (не показано).

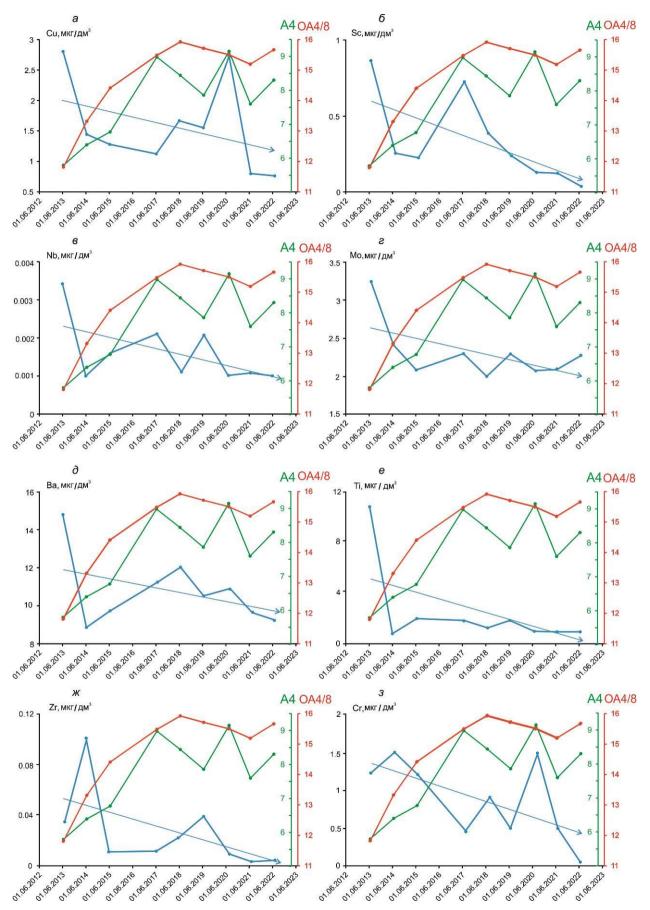


Рис. 5. Временные вариации OA4/8, A4 и содержаний микрокомпонентов, снижающихся с течением времени в минеральной воде из Олхинской скважины.

Fig. 5. Temporal variations of *AR4/8*, *A4*, and trace components temporally decreasing in mineral water from Olkha well.

Обсуждение

В подземных водах изменяется не только изотопный состав U, в них изменяется концентрация U. В минеральных водах Олхинской скважины различается два временных интервала изменения концентрации U. В 2013-2015 гг. его концентрация снижается (повышаются обратные значения концентрации) с возрастанием ОА4/8 от 12 до 15 единиц. В 2017–2022 гг. концентрация U возрастает (снижаются обратные значения концентрации), тогда как значения ОА4/8 остаются на уровне значений 15-16 единиц (рис. 6). трудно Уран растворим воде

восстановительных условиях, поэтому снижение концентрации U в олхинской минеральной воде в 2013-2015 гг. интерпретируется в связи с действием восстановителя. В этих условиях возрастает ОА4/8. Уран растворяется в минеральной воде в окислительных условиях. Следовательно, возрастание концентрации U в олхинской минеральной воде 2017-2022 гг. свидетельствует о действии окислителя. В этих условиях ОА4/8 остается без изменения. Таким образом, эф-Чердынцева-Чалова (возрастание фект ОА4/8) дает растворение карбоната в условиях воздействия восстановителя. При переходе к воздействию окислителя рост ОА4/8 прекращается.

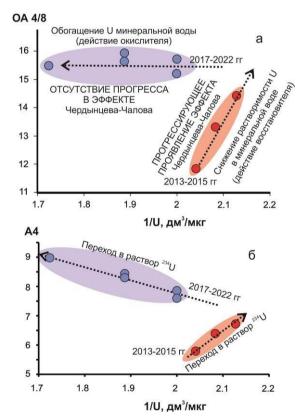


Рис. 6. Диаграмма OA4/8 - 1/U для олхинской минеральной воды в 2013–2015 и 2017–2022 гг. **Fig. 6.** AR4/8 vs 1/U plot for Olkha mineral water in 2013–2015 and 2017–2022.

Согласованность вариаций концентрации атома отдачи ²³⁴U с вариациями ОМ, макрои микрокомпонентов в минеральной воде свидетельствует о его переходе из твердого карбоната в раствор вследствие усиления растворения твердой карбонатной фазы. ²³⁴U добавляется в минеральную воду как любой другой растворяющийся компонент

карбоната. Его вариации в олхинской минеральной воде в 2017-2022 гг. не зависят от воздействия окислителя при возросшей растворимости U относительно других компонентов (включая 234 U).

Заключение

Полученные мониторинговые данные по минеральной воде из Олхинской скважины за период наблюдений 2013—2022 гг. свидетельствуют об изменяющихся во времени соотношениях макро- и микрокомпонентов. В ней проявляется прогрессирующее химическое растворение карбонатов, в результате которого *OA4/8* возрастает от 11.82 до 15.92 и *A4* от 5.8 до 9.1. Соответственно, возрастает ОМ, содержания всех макрокомпонентов и частично микрокомпонентов.

Из сопоставления *ОА4/8* и *А4* с макро- и микрокомпонентами минеральной воды следует вывод о существенном отличии в их поведении от первого изотопного параметра и о сходстве их поведения со вторым. Предполагается, что в 2013–2015 гг. *ОА4/8* возрастает с понижением концентрации U под действием восстановителя, а в 2017–2022 гг. не изменяется с возрастанием его концентрации под действием окислителя, тогда как *А4* ведет себя как обычный компонент химического растворения карбоната.

Благодарности

Измерения *OA4/8* и концентраций элементов 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 «Ультрамикроанализ» (ЛИН СО РАН).

Литература

Киселев Г.П., Зыков С.Б. Исследования эффекта Чердынцева-Чалова. Проблемы и перспективы // Материалы IV Международной конференции, г. Томск, 4–8 июня 2013 г. С. 275–278.

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Чебыкин Е.П. Вариации 234 U/ 238 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. doi:10.5800/GT-2018-9-4-0392

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Оргильянов А.И., Коваленко С.Н., Семинский А.К., Попов Е.П., Чебыкин Е.П.

Гидрогеохимическая зональность изотопов урана (234 U/ 238 U) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11, № 3. С. 632–650. https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496

Чалов П.И. Изотопное фракционирование природного урана. Фрунзе: Илим, 1975. 236 с.

Чердынцев В.В. Уран–234 // М.: Атомиздат, 1969. 308 с.

Чердынцев В.В. Ядерная вулканология // М.: Наука, 1973. 208 с.

Чебыкин Е.П., Гольдберг Е.Л., Куликова Н.С., Жученко Н.А., Степанова О.Г., Малопевная Ю.А. Метод определения изотопного состава аутигенного урана в донных отложениях озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 6. С. 604—616.

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 U/ 238 U в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.

Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачёв М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20, № 5. С. 613–631.

Яковлев Е.Ю., Киселёв Г.П., Дружинин С.В., Зыков С.Б. Исследование фракционирования изотопов урана (234 U, 238 U) в процессе образования кристаллов льда // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2016. № 3. С. 15–23. doi: 10.17238/issn2227-6572.2016.3.15

Finkel R.C. Uranium concentrations and 234U/238U activity ratios in fault-associated ground-water as possible earthquake precursors. Geophysical Research Letters. 1981. Vol. 8, No. 5. P. 453–456.

Kiselev G.P., Yakovlev E.Yu., Druzhinin S.V., Galkin A.S. Distribution of Radioactive Isotopes in Rock and Ore of Arkhangelskaya Pipe from the Arkhangelsk Diamond Province // Geology of Ore Deposits. 2017. Vol. 59, No. 5. P. 391–406. DOI: 10.1134/S1075701517050014

Timashev S.F. On the nature of the Cherdyntsev–Chalov effect // Russian Journal of Physical

Chemistry A. 2018. Vol. 92, No. 6. P. 1071–1075. DOI: 10.1134/S0036024418060183

Tokarev I., Zubkov A.A., Rumynin V.G., Polyakov V.A., Kuznetsov V.Yu., Maksimov F.E. Origin of high ²³⁴U/²³⁸U 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.

Yamamoto M., Sato T., Sasaki K., Hama K., Nakamura T., Komura K. Anomalously high ²³⁴U/²³⁸U activity ratios of Tatsunokuchi hot spring waters, Ishikawa Prefecture, Japan. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2003. Vol. 255, No. 2. P. 369–373.

Zverev V.L., Dolidze N.I., Spiridonov A.I. Anomaly of even isotopes of uranium in groundwater of seismically active regions of Georgia // Geochemistry International. 1975. Vol. 11. P. 1720–1724.

References

Chalov P.I. Isotopic fractionation of natural uranium // Frunze: Ilim, 1975. 236 p.

Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V. The first results of monitoring ²³⁴U/²³⁸U in water from active faults of the western coast of Southern Baikal // Doklady Earth Sciences. 2015. Vol. 460, No 4. P. 464–467.

Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A. The current state of the waters of the river. Selenges on the territory of Russia by the main components and trace elements // Chemistry in the interests of sustainable development. 2012. Vol. 20. P. 613–631

Cherdyntsev V.V. Uranium–234. Atomizdat Press, Moscow, 1969. 308 p.

Cherdyntsev V.V. Nuclear volcanology // Science, Moscow, 1973. 208 p.

Finkel R.C. Uranium concentrations and ²³⁴U/²³⁸U activity ratios in fault-associated groundwater as possible earthquake precursors // Geophysical Research Letters. 1981. Vol. 8, No. 5. P. 453–456.

Kiselev G.P., Yakovlev E.Yu., Druzhinin S.V., Galkin A.S. Distribution of Radioactive Isotopes in Rock and Ore of Arkhangelskaya Pipe from the Arkhangelsk Diamond Province // Geology of Ore Deposits. 2017. Vol. 59, No. 5. P. 391–406. DOI: 10.1134/S1075701517050014

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Chebykin E.P. The ²³⁴U/²³⁸U 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. 2018. Vol. 9, No. 4. P. 1217–1234. doi:10.5800/GT-2018-9-4-0392.

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Orgilyianov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes (²³⁴U/²³⁸U) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation. Geodynamics & Tectonophysics. 2020. Vol. 11, No. 3. P. 632–650. https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496

Timashev S.F. On the nature of the Cherdyntsev–Chalov effect // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2018. Vol. 92, No. 6. P. 1071–1075. DOI: 10.1134/S0036024418060183

Tokarev I., Zubkov A.A., Rumynin V.G., Polyakov V.A., Kuznetsov V.Yu., Maksimov F.E. Origin of high ²³⁴U/²³⁸U 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.

Yamamoto M., Sato T., Sasaki K., Hama K., Nakamura T., Komura K. Anomalously high ²³⁴U/²³⁸U activity ratios of Tatsunokuchi hot spring waters, Ishikawa Prefecture, Japan. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2003. Vol. 255, No. 2. P. 369–373.

Zverev V.L., Dolidze N.I., Spiridonov A.I. Anomaly of even isotopes of uranium in groundwater of seismically active regions of Georgia // Geochemistry International. 1975. Vol. 11. P. 1720–1724.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор, 664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3, Иркутский государственный университет, геологический факультет, заведующий кафедрой динамической геологии, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН,

заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru.

Rasskazov Sergei Vasilevich,

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,

664025, Irkutsk, st. Lenina, 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Head of Dynamic Geology Char,

664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Head of the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,

tel.: (3952) 51–16–59, email: rassk@crust.irk.ru.

Ильясова Айгуль Маратовна,

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

email: ila@crust.irk.ru.

Ilyasova Aigul Maratovna,

candidate of geological and mineralogical sciences, leading engineer,

664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

email: ila@crust.irk.ru.

Чебыкин Евгений Павлович,

кандидат химических наук, старший научный сотрудник,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,

Лимнологический институт СО РАН,

email: epcheb@yandex.ru.

Chebykin Evgeny Pavlovich,

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher,

664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

664033, Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,

Limnological Institute SB RAS,

email: epcheb@yandex.ru.