Оригинальная статья / Original article

УДК 550.845-032.27(1-925.11/.16)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-174-183>

Изотопно-гидрогеохимическая характеристика радоновых вод Белокурихинского месторождения

© А.А. Хвощевская^a, Ю.Г. Копылова^b, Д.А. Новиков^c,
А.Н. Пыряев^d, А.А. Максимова^e, А.С. Деркачев^f, А.А. Редин^g

^{a,b}Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

^{c,e,f}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия

^dИнститут геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

^gАО «Курорт Белокуриха», г. Белокуриха, Россия

Резюме: Цель данной работы заключалась в проведении комплексных изотопно-геохимических исследований минеральных вод Белокурихинского месторождения. Лабораторное изучение химического состава вод было выполнено методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Изотопный состав кислорода, водорода и углерода водорастворенной углекислоты исследовался с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device (для анализа отношений δD) и GasBench II (для анализа отношений $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C_{DIC}$). На месторождении распространены два водоносных горизонта: первый безнапорный водоносный горизонт объединяет рыхлые отложения четвертичного возраста, второй напорный водоносный горизонт включает граниты верхнепалеозойского возраста различной степени трещиноватости – от монолитных до выветрелых. По геохимическим коэффициентам было выделено три группы вод: трещинно-жильные воды гранитов, залегающие в выветрелых гранитах; грунтовые воды зоны редкоземельной минерализации и фонового состава; поверхностные воды р. Белокурихи. Изотопные данные по кислороду и водороду свидетельствуют, что эксплуатируемые водоносные горизонты Белокурихинского месторождения имеют инфильтрационное питание метеорными водами со смещением акцента питания к осадкам зимнего периода. В работе представлены первые данные комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований азотно-кремнистых слаборадоновых термальных вод Белокурихинского месторождения. Воды имеют $HCO_3-SO_4 Na$ и $SO_4-HCO_3 Na$ состав с величиной общей минерализации от 198 до 257 мг/дм³, характеризуются щелочными pH 8,6–9,6, содержанием кремния от 19,8 до 24,6 мг/дм³ и относятся к трещинно-жильным водам гранитов верхнего палеозоя. Активность ²²²Rn составляет до 359 Бк/дм³. Значения δD (от -126,9 до -102,7 ‰) и $\delta^{18}O$ (от -17,5 до -14,2 ‰) изученных вод указывают на их метеорное происхождение. Значения $\delta^{13}C_{DIC}$ варьируют от -9,7 до -25,6 ‰ и указывают на биогенное происхождение углерода.

Ключевые слова: радоновые воды, стабильные изотопы кислорода, водорода, углерода, Белокурихинское месторождение минеральных радоновых вод, Алтай-Саянская складчатая область

Благодарности: Исследования проводились при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-45-540004, а также Государственного Задания РФ «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

Для цитирования: Хвощевская А.А., Копылова Ю.Г., Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Деркачев А.С. [и др.]. Изотопно-гидрогеохимическая характеристика радоновых вод Белокурихинского месторождения. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 174–183. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-174-183>

Isotope-hydrogeochemical features of the Belokurikha field radon waters

© Albina A. Khvashchevskaya^a, Yulia G. Kopylova^b, Dmitry A. Novikov^c,
Aleksandr N. Pyrayev^d, Anastasia A. Maksimova^e, Anton S. Derkachev^f, Anatoly A. Redin^g

^{a,b}National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

^{c,e,f}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

^dV.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

^gBelokurikha Resort JSC, Belokurikha, Russia

Abstract: The purpose of the work is to carry out integrated isotope-geochemical studies of the mineral waters of the Belokurikha deposit. The methods of titrimetry, ion chromatography, inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) have been used in the laboratory investigation of the chemical composition of waters. The isotope composition

of oxygen, hydrogen and carbon in dissolved carbon dioxide has been studied with the help of the Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253 equipped with the attachments for sample preparation H/Device (to analyze the δD ratio) and GasBench II (to analyze $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C_{DIC}$ ratios). There are two aquifers at the deposit. The first nonartesian aquifer comprises loose sediments of the Quaternary age. The second artesian aquifer includes the granites of the upper Paleozoic age with the different fracture degree: from monolith to loosened. Three groups of waters are distinguished on the basis of geochemical coefficients: fracture-vein waters bedded in weathered granites; groundwaters of the zone of rare earth mineralization and background composition; surface waters of the Belokurikha river. The isotope data on oxygen and hydrogen provide evidence that the production aquifers of the Belokurikha field are fed through the infiltration of meteoric waters, with the feeding shift to winter precipitation. The paper provides the first data of the integrated isotope-hydrogeochemical studies of nitric-siliceous low-radon thermal waters of the Belokurikha deposit. The composition of these waters is $HCO_3-SO_4 Na$ and $SO_4-HCO_3 Na$ with the total dissolved salts value ranging from 198 to 257 mg/dm³. The waters are characterized by alkaline pH of 8.6–9.6, silicon content ranging from 19.8 to 24.6 mg/dm³, and they are referred to the fracture-vein waters of the Upper Paleozoic granites. ²²²Rn activity is up to 359 Bq/dm³. The ratios of δD (from -126.9 to -102.7 ‰) and $\delta^{18}O$ (from -17.5 to -14.2 ‰) in the studied waters indicate their atmospheric origin. The values of $\delta^{13}C_{DIC}$ vary from -9.7 to -25.6 ‰ and point to the biogenic origin of carbon.

Keywords: radon waters, stable isotopes of oxygen, hydrogen, carbon, Belokurikha deposit of mineral radon waters, the Altay-Sayan folded area

Acknowledgements: The research was funded by the project of the Fundamental Scientific Research no. 0331-2019-0025 of the Russian Foundation for Basic Research as a part of the scientific project no. 19-45-540004 and the State Task of the Russian Federation “Science” within the framework of the project no. FSWW-0022-2020.

For citation: Khvashchevskaya AA, Kopylova YG, Novikov DA, Pyrayev AN, Maksimova AA, Derkach AS, et al. Isotope-hydrogeochemical features of the Belokurikha field radon waters. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):174–183. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-174-183>

Введение

Радоновые воды на территории Сибири пользуются большим распространением благодаря особенностям геологического строения и широким проявлением процессов кислого магматизма. Открыто более 25 месторождений [1] и проявлений: Заельцовское [2–6], Каменское [7], Шивелигское [8], Шумак [9], Чойган [9] и другие [10–14].

Белокурихинское месторождение термальных азотно-кремнистых слаборадоновых вод расположено в западной части Алтае-Саянской складчатой области, в долине р. Белокурихи. Первые скважины глубиной до 140 м были пробурены в ходе детальных поисково-разведочных работ, проводившихся под руководством профессора М.И. Кучина в период с 1931 по 1938 гг. Большой вклад в изучение гидрогеологических условий месторождения внесли Н.М. Елманова, А.А. Логинов, А.А. Редин и другие. Эксплуатация ведется с 1949 г. по настоящее время. Утвержденные в 1996 г. эксплуатационные запасы термальных радоновых вод по категориям А+В составили 900 м³/сут., однако экспериментальным путем установлено, что оптимальная величина суммарного водоотбора из эксплуатационных скважин не должна превышать 674 м³/сут. Это позволит сохранить стабильность химиче-

ского состава подземных вод, включая бальнеологические показатели. В настоящее время на месторождении эксплуатируются скважины № 3э, 3д и 4э, в резерве скважины № 4д, 1э, 5э, 10э, также имеются три наблюдательные скважины 3гр, 4гр, 10гр (рис. 1, а).

Материалы и методы исследования

В марте 2020 г. в связи с выполнением работ по переоценке запасов подземных минеральных термальных радоновых вод на Белокурихинском месторождении было отобрано 15 проб из эксплуатационных и наблюдательных скважин, одного колодца, двух источников и р. Белокурихи. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. Исследование изотопного состава кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной уголекислоты проводилось в Аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Рис. 1. Геохимические особенности Белокурихинского месторождения радоновых вод:
 а – гидрогеологическая схема месторождения (1–3 – зоны распространения: 1 – аллювиальных вод, 2 – холодных трещинных вод гранитов, 3 – термальных трещинных вод гранитов; 4–7 – скважины: 4 – эксплуатационные, 5 – резервные (наблюдательные), 6 – наблюдательные (на грунтовые воды), 7 – разведочные; 8 – изогипсы, м; 9 – дробь слева: числитель – напор над поверхностью, м (май 2020 г.), знаменатель – глубина скважины, м; дробь справа: числитель – температура, °С, знаменатель – активность радона, Бк/дм³;
 б – диаграмма Пайпера состава природных вод Белокурихинского месторождения;
 в – распределение радона в водах эксплуатационной скважины в 3D

Fig. 1. Geochemical features of the Belokurikha radon water deposit:

а – hydrogeological scheme of the deposit (1–3 – distribution zones of: 1 – alluvial waters, 2 – cold fracture waters of granites, 3 – thermal fracture waters of granites; 4–7 – wells: 4 – production wells, 5 – reserve (observation) wells, 6 – groundwater observation wells, 7 – exploration wells; 8 – isohypsum, m; 9 – fraction on the left: numerator – head above the surface, m (May 2020), denominator – well depth, m; fraction on the right: numerator – temperature, °C, denominator – radon activity, Bq/dm³;
 б – Piper diagram of natural water composition of the Belokurikha deposit;
 в – 3D radon distribution in production well waters

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Гидрогеологическое строение. Особенности гидрогеологических условий месторождения определяются весьма сложным геологическим строением изучаемой территории, которая находится в зоне сочленения Западно-Сибирской плиты и горных сооружений Алтая. Переход между ними маркируется тектонической зоной, которая в рельефе выражена резким уступом и структурно контро-

лируется крупным Белокурихинским разломом субширотного простирания. Он оперяется более мелкими дизъюнктивными нарушениями, определяющими блоковую структуру месторождения и анизотропию фильтрационно-емкостных свойств [15]. В гидрогеологическом разрезе развиты два гидравлически взаимосвязанных водоносных горизонта: безнапорный, объединяющий рыхлые отложения четвертичного возраста, и напорный, включающий граниты верхнего палеозоя. Напорные

воды разгружаются в четвертичных отложениях и дренируются р. Белокурихой.

Гидрогеохимические особенности. Рассмотрим подробнее особенности геохимии изученных вод, разделенных на однородные геохимические совокупности с помощью коэффициентов (Ca/Si , Mg/Si , Na/Si , Si/Na , Ca/Na , Ca/Mg , rNa/rCl и SO_4/Cl). Отношения Ca/Na , Ca/Mg , Ca/Si , Mg/Si , Na/Si использованы для оценки особенностей обогащения вод за счет процессов гидролиза алюмосиликатов и конгруэнтного растворения карбонатов; $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- \gg 1$ и $\text{rNa}^+/\text{rCl}^- \gg 1$ – гидролиза алюмосиликатов и окисления сульфидных минералов; пропорциональное увеличение значений $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- = 1$, $\text{rNa}^+/\text{rCl}^- \geq 1$, $\text{Ca/Na} > 0$ – испарительного концентрирования.

Группа трещинно-жильных вод гранитов объединяет несколько разновидностей: термальные (32,4–42,6 °C); термальные и холодные (≈ 13 °C), залегающие в выветрелых гранитах; холодные зоны смешения с грунтовыми водами. Средние значения геохимических коэффициентов для данной группы составляют: $\text{Ca/Si} - 0,14$; $\text{Mg/Si} - 0,05$; $\text{Na/Si} - 3,8$; $\text{Si/Na} - 0,26$; $\text{Ca/Na} - 0,04$; $\text{Ca/Mg} - 6,74$; $\text{rNa/rCl} - 12,93$ и $\text{SO}_4/\text{Cl} - 4,99$. Это свидетельствует о преобладающей роли процессов гидролиза алюмосиликатов при формировании их химического состава. В целом термальные воды характеризуются $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ Na и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Na составом (рис. 1, б) с величиной общей минерализации от 198 до 257 мг/дм³, щелочными pH 8,6–9,6 и содержанием кремния от 19,8 до 24,6 мг/дм³. Холодная разновидность отличается $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Na составом и величиной общей минерализации 184–234 мг/дм³, широкой вариацией pH (6,9–9,1) и содержанием кремния от 17,1 до 21,9 мг/дм³. Содержания радионуклидов для данной группы составляют, мг/дм³: ^{238}U – от $1,12 \cdot 10^{-6}$ до $7,31 \cdot 10^{-3}$; ^{232}Th – от $1,77 \cdot 10^{-6}$ до $9,79 \cdot 10^{-5}$. Отношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ в термальных водах варьирует в интервале от $3,95 \cdot 10^{-3}$ до 9,28. В скважине 3гр отмечаются процессы смешения с грунтовыми водами, что проявляется в росте отношений до следующих значений: $\text{Ca/Si} - 0,48$; $\text{Mg/Si} - 0,25$; $\text{Ca/Na} - 0,14$; а также снижении до: $\text{Na/Si} - 3,38$; $\text{Ca/Mg} - 1,92$; $\text{rNa/rCl} - 7,45$; $\text{SO}_4/\text{Cl} - 2,93$. Сопоставимые

значения характеризуют отношение Si/Na 0,3. В микрокомпонентном составе вод этой группы следует отметить высокие концентрации, мг/дм³: $\text{Li}_{0,64} > \text{W}_{0,37} > \text{Mo}_{0,041} > \text{Hg}_{0,0077} > \text{As}_{0,0055} > \text{Ge}_{0,0047} > \text{Ga}_{0,004} > \text{Be}_{0,00028} > \text{Th}_{0,000098}$. В водах отмечаются признаки концентрирования алюминия, иттрия и редкоземельных элементов (РЗЭ).

Ко второй группе относятся две разновидности грунтовых вод: зоны редкоземельной минерализации (скважина 4гр) и фоновый состав. По сравнению с предыдущей группой возрастают средние значения геохимических коэффициентов у $\text{Ca/Na} - 3,16$; $\text{Ca/Si} - 6,22$; $\text{Mg/Si} - 1,25$; $\text{Si/Na} - 0,51$ и $\text{SO}_4/\text{Cl} - 6,63$. Данный рост, вероятно, обусловлен значительной долей карбонатной составляющей во вмещающих породах, что сопровождается закономерным снижением: $\text{Na/Si} - 1,98$; $\text{Ca/Mg} - 5,13$; $\text{rNa/rCl} - 12,13$. Воды отличает HCO_3 Ca состав с величиной общей минерализации от 252 до 392 мг/дм³, нейтральные и слабощелочные показатели pH (7,3–8,1) и содержание кремния от 7,9 до 10,5 мг/дм³. Содержания радионуклидов составляют, мг/дм³: ^{238}U – от $4,18 \cdot 10^{-3}$ до $2,93 \cdot 10^{-2}$; ^{232}Th – от $2,46 \cdot 10^{-6}$ до $8,57 \cdot 10^{-4}$. Отношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ в термальных водах варьирует в интервале от $2,94 \cdot 10^{-4}$ до $2,92 \cdot 10^{-2}$. В водах скважины 4гр отмечаются повышенные значения многих микрокомпонентов, мг/дм³: $\text{Fe}_{20,7} > \text{P}_{0,80} > \text{Mn}_{0,165} > \text{Ti}_{0,054} > \text{V}_{0,030} > \text{U}_{0,029} > \text{Zn}_{0,027} > \text{Cu}_{0,015} > \text{Cr}_{0,010} > \text{As}_{0,0044} > \text{Co}_{0,0030} > \text{Se}_{0,0014} > \text{Ga}_{0,0012} > \text{Th}_{0,00086} > \text{Zr}_{0,00038} > \text{Be}_{0,00018} > \text{Ge}_{0,00018} > \text{Bi}_{0,000046}$. Наряду с высокими содержаниями радиоактивных элементов следует отметить высокие концентрации иттрия (до 0,0025 мг/дм³) и РЗЭ (достигают 0,026 мг/дм³ для суммы легких РЗЭ и 0,0021 для суммы тяжелых РЗЭ).

К третьей разновидности относятся поверхностные воды р. Белокурихи, состав которой изменяется вниз по течению от HCO_3 Ca-Mg до HCO_3 Mg-Ca. Величина общей минерализации варьирует от 124 до 133 мг/дм³, pH – от 7,5 до 7,6, а содержание кремния меняется от 7,8 до 8,6 мг/дм³. Содержания радионуклидов составляют, мг/дм³: ^{238}U – от $8,33 \cdot 10^{-4}$ до $1,81 \cdot 10^{-3}$; ^{232}Th – от $8,21 \cdot 10^{-5}$ до $2,2 \cdot 10^{-4}$. Отношение $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ в термальных водах варьирует в интервале от $4,54 \cdot 10^{-2}$ до

$2,64 \cdot 10^{-1}$. Средние значения геохимических коэффициентов составляют: Ca/Si – 1,89; Mg/Si – 1,11; Na/Si – 0,69; Si/Na – 1,63; Ca/Na – 2,93; Ca/Mg – 1,71; rNa/rCl – 5,45; SO₄/Cl – 3,7. В поверхностных водах наблюдаются сопоставимые концентрации кремния по сравнению с грунтовыми водами. Проба, отобранная в городе, имеет все черты антропогенного загрязнения, что проявляется в росте содержания натрия и хлора. По существенному обогащению вод р. Белокурихи РЗЭ можно считать, что они также подвержены влиянию редкоземельной минерализации.

Изотопные исследования. В настоящей работе впервые выполнен комплекс исследований изотопного состава водорода и кислорода вод, а также углерода в водорастворенной форме углерода (англ.: *dissolved inorganic carbon, DIC*). Анализ полученных данных по изотопным отношениям кислорода и водорода изученных вод (рис. 2, а) показал, что все они имеют метеорное происхождение (значения δD и $\delta^{18}O$ располагаются в большинстве случаев между глобальной (англ.: *global meteoric water line, GMWL*) и локальной (англ.: *local meteoric water line, LMWL*) линиями метеорных вод¹ [16]; локальная линия метеорных вод приведена для ближайшей точки наблюдений из представленных в международной базе данных Wiser – для города Иркутска). Несущественные положительные отклонения значений $\delta^{18}O$ от локальной линии метеорных вод, по-видимому, обусловлены эффектом испарения вод до их инфильтрации [17, 18]. Для большинства подземных вод (см. рис. 2, а) характерно обогащение изотопных отношений кислорода и водорода легкими изотопами H и ^{16}O , приводящее к смещению величин δD и $\delta^{18}O$ к более отрицательным значениям вдоль локальной линии метеорных вод. Вероятно, это свидетельствует об инфильтрационном питании этих водоносных горизонтов водами со смещением акцента питания к зимнему периоду года (за счет активной эвапотранспирации летних осадков), поскольку проявление высотного эффекта – уменьшения концентрации дейтерия и ^{18}O

в атмосферных осадках по мере увеличения абсолютных отметок местности – в исследованной области представляется затруднительным (перепад высот не превышает 100 м) [19].

Значения $\delta^{13}C_{DIC}$ в исследованных водах варьируют в диапазоне от -9,7 до -12,1 ‰ для поверхностных вод р. Белокурихи и от -13,9 до -25,6 ‰ для подземных вод (рис. 2, б). При этом содержание DIC по сумме трех компонентов (CO_{2aq}, HCO₃⁻ и CO₃²⁻) составляет от 1300 до 4800 мкмоль/л. Все полученные значения углеродных дельт, а также содержание DIC в водах указывают на явное участие биогенной почвенной углекислоты, производимой при распаде остатков растений с фотосинтезом типа C₃, в формировании DIC. Существенная разница изотопного состава углерода в DIC изученных вод, по-видимому, может быть обусловлена различным геохимическим типом вод и, соответственно, разницей в соотношении компонентов DIC. Переход почвенной углекислоты в каждую из указанных форм сопровождается изотопным фракционированием, существенно различающимся величиной коэффициента ϵ [20]. Наиболее отрицательным значениям $\delta^{13}C_{DIC}$ соответствует подземная вода с наибольшей долей водорастворенного CO_{2aq} (более 50 % от общей суммы DIC), имеющего в отличие от HCO₃⁻ и CO₃²⁻ отрицательную величину коэффициента ϵ , что, по-видимому, и является первопричиной самого легкого изотопного состава водорастворенного углерода в указанной пробе.

Углекислота вод р. Белокурихи в значительной степени насыщается легким изотопом ^{12}C после подпитки реки подземными водами (значения $\delta^{13}C_{DIC}$ становятся легче на 2,4 ‰) на фоне небольшого обогащения легкими изотопами водорода и кислорода самих вод (0,7 и 0,1 ‰ соответственно). Это может как свидетельствовать об участии поверхностного водосбора грунтовых вод в привнесении DIC в воды реки, так и указывать на то, что величина $\delta^{13}C_{DIC}$ является более чувствительным в сравнении с δD и $\delta^{18}O$ маркером смешения водных потоков.

¹ International Atomic Energy Agency // [iaea.org](https://www.iaea.org) [Электронный ресурс]. URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx> (20.01.2021).

Рис. 2. Распределение стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода в радоновых водах Белокурихинского месторождения:

- a** – значения δD и $\delta^{18}O$ для природных вод Белокурихинского месторождения радоновых вод относительно глобальной и локальной линий метеорных вод;
b – содержание и изотопный состав углерода в водорастворенной форме углерода исследованных вод:
1 – трещинно-жильные воды гранитов; 2 – зона редкоземельной минерализации и фонового состава; 3 – поверхностные воды

Fig. 2. Distribution of stable isotopes of hydrogen, oxygen and carbon in the radon waters of the Belokurikha deposit:

- a** – δD and $\delta^{18}O$ values for natural waters of the Belokurikha deposit of radon waters relatively global and local lines of meteoric water;
b – content and isotopic composition of carbon in the carbon water dissolved form of the studied waters:
1 – fracture-vein water of granites; 2 – zone of rare earth mineralization and background composition; 3 – surface water

Закключение

Таким образом, в настоящей работе представлены первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Белокурихинского месторождения термальных азотно-кремнистых слаборадоновых вод. Установлены особенности трех геохимических групп природных вод, которые подразделяются в свою очередь на семь разновидностей. Термальные трещинно-жильные воды гранитоидов, которые эксплуатируются на месторождении с 1949 г., имеют $HCO_3-SO_4 Na$ и $SO_4-HCO_3 Na$ состав с величиной общей минерализации от 198 до 257 мг/дм³, щелочными показателями pH 8,6–9,6, содержанием кремния от 19,8 до 24,6 мг/дм³. Содержания радионуклидов составляют, мг/дм³: ^{238}U – от $1,12 \cdot 10^{-6}$ до $7,31 \cdot 10^{-3}$; ^{232}Th – от $1,77 \cdot 10^{-6}$ до $9,42 \cdot 10^{-5}$. Отношение $^{232}Th/^{238}U$ в термальных

водах варьирует в интервале от $3,95 \cdot 10^{-3}$ до 9,28 при среднем значении 2,92. Активность ^{222}Rn в скважинах варьирует от 160 до 360 Бк/дм³ при среднем значении 290 Бк/дм³. Грунтовые и поверхностные воды подвержены влиянию редкоземельной и радиоактивной минерализации.

Предполагается инфильтрационное питание эксплуатируемых водоносных горизонтов Белокурихинского месторождения метеорными водами со смещением акцента питания к осадкам зимнего периода. Содержание DIC, а также значения $\delta^{13}C_{DIC}$ в исследованных водах указывают на биогенное происхождение углерода. Соотношение компонентов DIC оказывает существенное влияние на конечное значение $\delta^{13}C_{DIC}$ каждой пробы. Для поверхностных вод р. Белокурихи наблюдается обогащение DIC легким изотопом углерода ^{12}C .

Список литературы

1. Посохов Е.В., Толстихин Н.И. Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические). Л.: Недра, 1977. 240 с.

2. Вериго Е.К., Гусев В.К., Быкова В.В. Заельцовское месторождение радоновых вод // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной

Сибири / отв. ред. Г.А. Селятицкий. Вып. 14. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1979. С. 47–51.

3. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1255–1274. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0394>

4. Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1172. P. 012096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012096>

5. Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1451. P. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1451/1/012007>

6. Novikov D.A., Dultsev F.F., Kamenova-Totzeva R., Korneeva T.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaelsovsky-Mochishche zone of Novosibirsk, Russia // Environmental Earth Sciences. 2021. Vol. 80. P. 216. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09486-w>

7. Корнеева Т.В., Новиков Д.А. Формы миграции химических элементов в радоновых водах месторождения «Горводолечебница» (г. Новосибирск) // Труды Ферсмановской научной сессии Геологического института Кольского научного центра Российской академии наук. 2020. № 17. С. 287–291. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.054>

8. Булатов А.А., Копылова Ю.Г., Джабарова Н.К., Рычкова К.М., Аракчаа К.Д., Хвощевская А.А. [и др.]. Новые сведения о составе радоновых вод (Шивелигское месторождение) // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. 2013. № 1. С. 154–161.

9. Минеева Л.А., Аракчаа К.Д., Кызыл О.М. Физико-химическая характеристика минеральных вод месторождений Шумак и Чойган // Известия Иркутского государственного университета. Науки о Земле. 2016. Т. 17. С. 115–134.

10. Елисеев В.А. Радоновые азотно-термальные воды Алтая // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2010. № 5. С. 38–40.

11. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Вакуленко Л.Г., Сухорукова А.Ф., Пыряев А.Н. [и др.]. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 3. С. 135–145.

12. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В., Каменова-Тоцева Р.М., Максимова А.А., Деркачев А.С. [и др.]. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 4. С. 192–208.

13. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Сухорукова А.Ф., Максимова А.А., Черных А.В., Деркачев А.С. Радионуклиды в природных водах Новосибирской городской агломерации // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. уч. Улан-Удэ, 2020. С. 134–138.

14. Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Сухорукова А.Ф. Геохимия системы вода – порода проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. уч. Улан-Удэ, 2020. С. 88–92.

15. Дергунов А.Б. Структуры зоны сочленения Горного Алтая и Западного Саяна. М.: Наука, 1967. 227 с.

16. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. Vol. 133. Iss. 3465. P. 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>

17. Chafouq D., Mandour A.E., Elgettafi M., Himi M., Chouikri I., Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco) // Journal of African Earth Sciences. 2018. Vol. 139. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.11.007>

18. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA // Journal of Geochemical Exploration. 2020. Vol. 210. P. 106445. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106445>

19. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.

20. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO₂ // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. Vol. 59. Iss. 1. P. 107–114.

References

1. Posokhov EV, Tolstikhin NI. *Mineral waters (medical, industrial, power)*. Leningrad: Nedra; 1977. 240 p. (In Russ.)

2. Verigo EK, Gusev VK, Bykova VV. Zaelsovskoe deposit of radon waters. In: Selyatitskii GA (ed.). *Novye dannye po geologii i poleznym iskopaemym Zapadnoi Sibiri = New data on geology and minerals of Western Siberia*. Iss. 14. Tomsk: Tomsk University; 1979. p.47–51. (In Russ.)

3. Novikov DA, Sukhorukova AF, Korneeva TV. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Zaelsovsko-Mochishchensky zone of radon waters in the southern West

Siberia. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(4):1255–1274. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0394>

4. Novikov DA, Korneeva TV. Microelements in radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1172:012096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012096>

5. Novikov DA, Dultsev FF, Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*.

2020;1451:012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1451/1/012007>

6. Novikov DA, Dultsev FF, Kamenova-Totzeva R, Korneeva TV. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zael'tsovsky-Mochishche zone of Novosibirsk, Russia. *Environmental Earth Sciences*. 2021;80:216. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09486-w>

7. Korneeva TV, Novikov DA. Migration Forms of chemical elements in radon waters of the Gorvodolechbenitsa field, Novosibirsk. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii Geologicheskogo instituta Kol'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2020;17:287–291. (In Russ.) <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.054>

8. Bulatov AA, Kopylova YG, Dzhabarova NK, Rychkova KM, Arakchaa KD, Khvashchevskaya AA, et al. New information about a composition of the radon waters (Shivelig's deposit). *Kurortnaya baza i prirodnye lechebno-ozdorovitel'nye mestnosti Tuvy i sopredel'nykh regionov*. 2013;1:154–161. (In Russ.)

9. Mineeva LA, Arakchaa KD, Kyzyl OM. The physico-chemical characteristics of mineral waters of Shumak and Choigan. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences*. 2016;17:115–134. (In Russ.)

10. Eliseev VA. Radon- and nitrogen-containing thermal waters of the Altai region. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoi fizicheskoi kul'tury*. 2010;5:38–40. (In Russ.)

11. Novikov DA, Kopylova YuG, Vakulenko LG, Sukhorukova AF, Pyrayev AN, et al. Isotope geochemical features of occurrence of low-radon waters “Inskie springs” (South-Western Siberia). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(3):135–145. (In Russ.)

12. Novikov DA, Sukhorukova AF, Korneeva TV, Kamenova-Totzeva RM, Maksimova AA, Derkachev AS, et al. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the “Kamenskoe” field of radon-rich waters (Novosibirsk). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(4):192–208. (In Russ.)

13. Novikov DA, Dul'tsev FF, Sukhorukova AF, Maksimova AA, Chernykh AV, Derkachev AS. Radionuclides in natural waters of the Novosibirsk urban agglomeration. In: *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeistviya vody s gornymi porodami: materialy IV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Geological evolution of water and rocks interaction: materials of 4th All-Russian scientific conference with international participation*. Ulan-Ude; 2020. p.134–138. (In Russ.)

14. Novikov DA, Vakulenko LG, Sukhorukova AF. Geochemistry of the water-rock system of Inskiy springs weakly radon water manifestation (south of West Siberia). In: *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeistviya vody s gornymi porodami: materialy IV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Geological evolution of water and rocks interaction: materials of 4th All-Russian scientific conference with international participation*. Ulan-Ude; 2020. p.88–92. (In Russ.)

15. Dergunov AB. *Structures of the zone of conjugation between mountain Altai and West-Sayan*. Moscow: Nauka; 1967. 227 p. (In Russ.)

16. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*. 1961;133(3465):1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>

17. Chafouq D, Mandour AE, Elgettafi M, Himi M, Chouikri I, Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco). *Journal of African Earth Sciences*. 2018;139:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.11.007>

18. Newman CP, Poulson SR, Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA. *Journal of Geochemical Exploration*. 2020;210:106445. <https://doi.org/10.1016/j.jexplo.2019.106445>

19. Ferronskii VI, Polyakov VA. *Isotopy of the Earth's hydrosphere*. Moscow: Nauchnyi mir; 2009. 632 p. (In Russ.)

20. Zhang J, Quay PD, Wilbur DO. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995;59(1): 107–114.

Сведения об авторах / Information about the authors

Хвощевская Альбина Анатольевна,
кандидат геолого-минералогических наук,
заведующая Проблемной научно-исследовательской
лабораторией гидрогеохимии,
Инженерная школа природных ресурсов,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30, Россия,
e-mail: garibova@yandex.ru
Albina A. Khvashchevskaya,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Fundamental Research Laboratory of Hydrogeochemistry,
Engineering School of Natural Resources,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia,
e-mail: garibova@yandex.ru

Копылова Юлия Григорьевна,

кандидат геолого-минералогических наук,
главный инженер Проблемной научно-исследовательской
Лаборатории гидрогеохимии,
Инженерная школа природных ресурсов,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 30, Россия,
e-mail: unpc_voda@mail.ru

Yulia G. Kopylova,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Chief Engineer of the Fundamental Research Laboratory of Hydrogeochemistry,
Engineering School of Natural Resources,
National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia,
e-mail: unpc_voda@mail.ru

Новиков Дмитрий Анатольевич,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
заведующий Лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3/6, Россия,
✉ e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Dmitry A. Novikov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Head of the Laboratory of Hydrogeology of Siberian Sedimentary Basins,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
3/6 Academician Koptug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
✉ e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Пыряев Александр Николаевич,

кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник Лаборатории изотопно-аналитической геохимии,
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия,
e-mail: pyrayev@gmail.com

Aleksandr N. Pyrayev,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher of the Laboratory of Isotope-Analytical Geochemistry,
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
3 Academician Koptug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: pyrayev@gmail.com

Максимова Анастасия Алексеевна,

инженер Лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3/6, Россия,
e-mail: rock.nastaya64@gmail.com

Anastasia A. Maksimova,

Engineer of the Laboratory of Hydrogeology of Siberian Sedimentary Basins,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
3/6 Academician Koptug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: rock.nastaya64@gmail.com

Деркачев Антон Сергеевич,
инженер Лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3/6, Россия,
e-mail: a.derkachev@g.nsu.ru
Anton S. Derkachev,
Engineer of the Laboratory of Hydrogeology of Siberian Sedimentary Basins,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
3/6 Academician Koptug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: a.derkachev@g.nsu.ru

Редин Анатолий Александрович,
главный гидрогеолог,
АО «Курорт Белокуриха»,
659900, г. Белокуриха, ул. Мясникова, 2, Россия,
e-mail: anatoliy-redin@yandex.ru
Anatoly A. Redin,
Chief Hydrogeologist,
Belokurikha Resort JSC,
2 Myasnikov St., Belokurikha 659900, Russia,
e-mail: anatoliy-redin@yandex.ru

Заявленный вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.03.2021; одобрена после рецензирования 08.04.2021; принята к публикации 12.05.2021.

The article was submitted 04.03.2021; approved after reviewing 08.04.2021; accepted for publication 12.05.2021.