

УДК 556.332.52(571.1)

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СЛАБОРАДОНОВЫХ ВОД «ИНСКИЕ ИСТОЧНИКИ» (ЮГ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Новиков Дмитрий Анатольевич^{1,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Копылова Юлия Григорьевна³,
unpc_voda@mail.ru

Вакуленко Людмила Галериевна^{1,2},
VakulenkaLG@ipgg.sbras.ru

Сухорукова Анна Федоровна^{1,2},
SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

Пыряев Александр Николаевич^{4,2},
pyrauev@igm.nsc.ru

Максимова Анастасия Алексеевна²,
rock.nastaya64@gmail.com

Дульцев Федор Федорович¹,
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Черных Анатолий Витальевич¹,
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6.

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

⁴ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3

Актуальность исследования заключается в получении первых изотопно-geoхимических данных о природных водах и вмещающих горных породах проявления слаборадоновых вод «Инские источники».

Цель: изучить особенности химического состава природных вод и водовмещающих пород и получить первые сведения по суммарной δ -и β -активности природных вод, активности ^{222}Rn и изотопному составу δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, ^{234}U , ^{226}Ra и ^{228}Ra .

Методы. Отбор проб выполнялся в соответствии с общепринятыми методиками. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанным плазмой проводилось в ПНИЛ гидрохимии ИШПР ТПУ. Анализ комплекса изотопных соотношений δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ вод и растворенного неорганического углерода проводился в центре коллективного пользования Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН с помощью прибора *Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253*. Данные по суммарной δ -и β -активности природных вод, а также активностях ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra и ^{228}Ra получены с помощью гамма-спектрометрии и альфа-спектрометрии (после предварительной радиохимической пробоподготовки).

Результаты. В 2019 г. в 35 км от г. Новосибирска, вдали от известных гранитных массивов, открыто проявление слаборадоновых вод «Инские источники», относящееся к водам зоны региональной трещиноватости. В настоящей работе приводятся первые результаты их geoхимических исследований. Установлено, что воды источников умеренно пресные $\text{HCO}_3\text{Mg-Ca}$ состава с величиной общей минерализации от 389 до 536 мг/дм³ с содержаниями кремния 4,14–8,61 мг/дм³. Они характеризуются pH от нейтральных до слабощелочных (7,1–8,4), окислительно-геохимической обстановкой с $Eh +205,3\text{--}+231,8\text{ mV}$ и содержанием O_2 раств. 6,24–12,26 мг/дм³. Установленная активность ^{222}Rn варьирует в диапазоне 7–149 Бк/дм³; содержания: ^{238}U от $2,83 \cdot 10^{-3}$ до $4,13 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³ и ^{232}Th от $2,39 \cdot 10^{-6}$ до $1,16 \cdot 10^{-5}$ мг/дм³. По изотопному составу воды имеют инфильтрационное происхождение. Диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$ в водах меняется от –17,1 до –16,7 ‰ со значениями δD от –128,4 до –126,2 ‰ и вариацией $\delta^{13}\text{C}$ от –13,1 до –10,3 ‰. Вмещающие породы представлены глинистыми сланцами темно-серого (до черного), иногда серого цвета, с небольшой примесью алевритового, песчано-алевритового материала. Изотопный состав кальцита вмещающих пород характеризуется близкими значениями: $\delta^{13}\text{C}$ варьирует от –3,1 до –2,7 ‰, $\delta^{18}\text{O}$ – от 17,2 до 18,4 ‰. Выбеленные глинистые сланцы характеризуются облегчением по $\delta^{13}\text{C}$ (до –11,0 ‰) и по $\delta^{18}\text{O}$ (до 13,9 ‰). Также эти образцы по результатам geoхимических исследований характеризуется существенным снижением (в несколько раз) содержания всех элементов-примесей (кроме U), свидетельствующим об активном взаимодействии вод с вмещающими породами.

Ключевые слова:

Радоновые воды, стабильные изотопы, уранизотопное отношение, уран, радий, радон, новое проявление радоновых вод «Инские источники», Новосибирская городская агломерация, Западная Сибирь.

Введение

Новосибирская городская агломерация (НГА) активно развивается на протяжении последнего века. В настоящее время темпы ввода нового жилья для населения достигают 1 млн м² в год и более. К сожалению, застройка новых районов приводит к вырубке лесных массивов и деградации природных ландшаф-

тов. В этой связи возникает острая необходимость в организации и обустройстве туристско-рекреационных зон для отдыха городского населения. Одним из важнейших ресурсов для их успешного развития являются природные воды (речные системы), обладающие большой эстетической ценностью. При этом одной из основных опасностей в пределах НГА

является широкое развитие радоновых вод, имеющих природное происхождение. ООН (комитет UNSCEAR) оценил, что воздействие естественных источников вносит более 98 % дозы облучения населения. Естественная радиоактивность природных вод вызывает в мире большой интерес [1–22].

Природные радионуклиды попадают в организм человека в основном при дыхании (^{222}Rn , ^{220}Rn и их продукты распада), с питьевой водой и пищей (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{222}Rn). Радон (^{222}Rn) – химически инертный и очень подвижный газ, продукт распада урана (^{238}U). Он является основным источником воздействия ионизирующего излучения на население в большинстве стран, считаясь второй наиболее распространенной причиной рака легких после курения сигарет. В этой связи основная цель настоящего исследования заключена в выявлении изотопно-geoхимических особенностей подземных вод и вмещающих пород одного из проявлений радоновых вод НГА – «Инских источников», расположенных на расстоянии около 35 км от известных гранитных массивов.

Материалы и методы

Ввиду незначительной глубины залегания источников эманации радона (гранитных массивов) в природных водах НГА отмечается его активность, достигающая в некоторых объектах до 43764 Бк/дм³. В августе 2019 г. во время полевых работ, связанных с изучением радоновых вод НГА, в результате последующих лабораторных исследований была выявлена повышенная активность радона в четырех естественных выходах природных вод (источниках) в долине реки Иня (рис. 1). Источники были повторно опробованы в ноябре этого же года. Активность радона (^{222}Rn) составила до 149 Бк/дм³. Интересным фактом является то, что впервые открытое проявление слаборадоновых вод «Инские источники» расположено вдали от известных гранитных массивов города Новосибирска и его окрестностей, с которыми связаны более десяти месторождений минеральных радоновых вод – «Заельцовское», «Горводолечница» и другие [23–31].

Во время экспедиционных работ непосредственно на источниках были определены нестабильные параметры (рН, Eh, температура, содержание растворенного O_2 , HCO_3^-) с помощью полевой гидрохимической лаборатории и полевого оборудования (Hanna HI9125, кислородомер АКПМ-1-02Л), общая минерализация вод (кондуктометр S3-Field kit Seven2Go, Mettler Toledo). Измерение содержаний радона в природных водах проводилось с помощью комплекса «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН. Последующее лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой (ИСП) проводилось в ПНИЛ гидрохимии ИШПР ТПУ (аналитики О.В. Чеботарева, Н.В. Бублий, А.С. Погуца, В.В. Куровская, К.Б. Кривцова, Л.А. Ракул).

Анализ комплекса величин δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ для вод и растворенного неорганического углерода (Dissolved Inorganic Carbon (DIC)) проводился в центре

коллективного пользования ИГМ СО РАН с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device (для анализа δD) и GasBench II (для анализа $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$). Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, δD и $\delta^{18}\text{O}$ измерялись относительно мировых стандартов: VSMOW2; SLAP2; GISP – для анализа водорода и кислорода; NBS-18; NBS-19 – для анализа $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. Ошибка определения изотопного состава стандартов по углероду и кислороду – не более 0,1 ‰, по водороду – не более 2 %. Данные по суммарной α - и β -активности природных вод, а также активностям ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra и ^{228}Ra получены с помощью гамма-спектрометрии и альфа-спектрометрии (после предварительной радиохимической пробоподготовки).

Нами также впервые были выполнены комплексные исследования водовмещающих пород с применением современных аналитических методов: поляризационная и сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионным спектрометром, рентгеноструктурный, ИСП-МС, изотопный анализы.

Изотопно-geoхимические особенности природных вод

Изученные воды четырех «Инских источников» относятся к водам зоны региональной трещиноватости. Они умеренно пресные $\text{HCO}_3^- \text{Mg-Ca}$ состава с величиной общей минерализации от 389 до 536 мг/дм³, содержанием кремния 4,14–8,61 мг/дм³ и органического углерода 0,3–1,5 мг/дм³. Отмечается рост величины общей минерализации от августа к ноябрю по всем изученным источникам на 24–89 мг/дм³, за исключением № 2, который оказался в это время сухим. Геохимические параметры (рН, Eh и O_2) контролируются в первую очередь условиями залегания природных вод и характером их водообмена, что хорошо иллюстрируется полученными данными. Воды характеризуются рН от нейтральных до слабощелочных (7,1–8,4), окислительно-геохимической обстановкой с Eh +205,3 – +231,8 мВ с содержанием O_2 раств. 6,24–12,26 мг/дм³. В источнике № 3 выявлена значительная связь с поверхностными водами, что проявляется слабощелочными рН 8,3–8,4 и содержанием O_2 раств. до 12,26 мг/дм³.

Трещинно-жильные радоновые воды Новосибирского гранитоидного массива характеризуются средними отношениями Ca/Na=3,6; Ca/Mg=2,9; Ca/Si=14,0; Mg/Si=4,9; Na/Si=3,9; Si/Na=0,3; rNa/rCl=1,7 и SO₄/Cl=2,0. Источники же значительно отличаются по величинам всех геохимических коэффициентов. Так, Ca/Na=13,2; Ca/Mg=6,3; Ca/Si=13,7; Mg/Si=2,2; Na/Si=1,1; Si/Na=1,0; rNa/rCl=2,0 и SO₄/Cl=2,5. Более чем десятикратное пропорциональное превышение концентраций кальция и натрия над концентрациями кремния в водах источников свидетельствует об алюмоシリкатном составе водовмещающих отложений. По результатам геофизических исследований (метод сопротивлений в модификации электротомографии) установлена ослабленная трещиноватая зона между источниками № 2 и 3, а также высокомонийный объект со значениями УЭС 1000–4000 Ом·м, что может предполагать наличие дайки спессартитов, кварцевых монцодиорит-порфиридов, широко развитых в изучаемом районе.

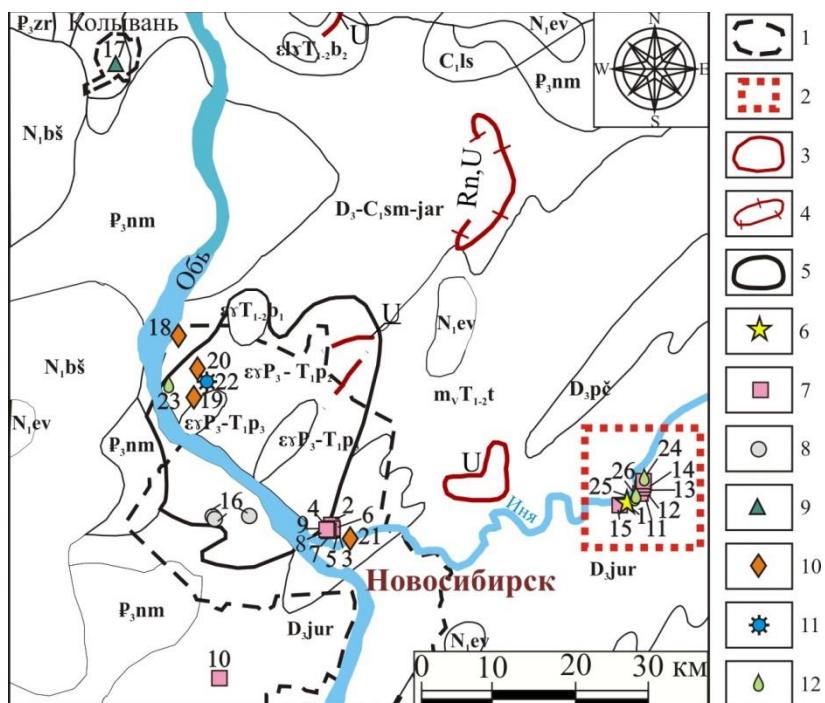


Рис. 1. Местоположение изученных объектов. Границы: 1 – административные, 2 – Инских источников; аномалии: 3 – U в рыхлых отложениях, 4 – Rn , U гидро geoхимических; 5 – Новосибирский гранитный массив; Типы вод по условиям залегания: 6 – грунтовые воды покровных карбонатных отложений (группа I): 1 – колодец; 7 – воды зоны региональной трещиноватости (группа II): карьер Борок; 2 – техногенное озеро № 1, 3 – техногенное озеро № 2, 4 – техногенное озеро № 3, 5 – источник № 1, 6 – источник № 2 (водопад), 7 – источник № 3 (водопад), 8 – источник № 4 (водопад), 9 – источник № 5 (водопад), 10 – Святой источник, с. Верх-Тула; «Инские источники»: 11 – источник № 1, 12 – источник № 2, 13 – источник № 3, 14 – источник № 4, 15 – скважина глубиной 80 м; 8 – трещинно-жильные воды гранитоидов (группа III): 16 – скважина в Городской больнице № 34, г. Новосибирск; 9 – трещинно-жильные воды гранитоидов в условиях антропогенного влияния (группа IV): 17 – скважина глубиной 18 м в Покровском Александро-Невском женском монастыре, р.п. Колывань; 10 – поверхностные воды (группа V): 18 – протока р. Оби, 19 – р. 2-я Ельцовка, 20 – Озеро X, истоки р. 2-я Ельцовка, 21 – р. Иня; 11 – поверхностные воды, подверженные влиянию процессов континентального засоления (группа VI): 22 – р. 2-я Ельцовка, зарегулированное русло по ул. Георгия Колонда; 12 – поверхностные воды в условиях антропогенного влияния (группа VII): 23 – р. Обь, Заельцовский бор; 24 – р. Иня, напротив источника № 4; 25 – р. Иня, ниже источника № 1; 26 – р. Иня, ближе к источнику № 1

Fig. 1. Location of the studied objects. Boundaries: 1 – administrative, 2 – study area – «Inskie springs»; anomalies: 3 – U in soft sediments, 4 – hydrogeochemical Rn and U ; 5 – boundaries of the Novosibirsk granite massif. Water types according to occurrence conditions: 6 – groundwater of drape carbonate (group I): 1 – well; 7 – waters of the zone of regional fracturing (group II): Borok quarry: 2 – technogenic lake no. 1, 3 – technogenic lake no. 2, 4 – technogenic lake no. 3, 5 – spring no. 1, 6 – spring no. 2 (waterfall), 7 – spring no. 3 (waterfall), 8 – spring no. 4 (waterfall), 9 – spring no. 5 (waterfall), 10 – Svyatoy spring, v. Verkh-Tula; Inskie springs: 11 – no. 1, 12 – no. 2, 13 – no. 3, 14 – no. 4, 15 – well (depth 80 m); 8 – fractured vein waters of granitoids (group III): 16 – well in the Novosibirsk General Hospital no. 34; 9 – fissure-vein waters of granitoids under conditions of anthropogenic influence (group IV): 17 – well (depth 18 m) in the Pokrovskaya Alexander Nevsky Convent, Kolyvan; 10 – surface waters (group V): 18 – Ob river, 19 – 2-nd Yeltsovka river, 20 – lake X, river head of 2-nd Yeltsovka, 21 – r. Inya; 11 – surface waters affected by continental salinization processes (group VI): 22 – river 2-nd Yeltsovka in technogenic stream bed; 12 – surface waters under conditions of anthropogenic influence (group VII): 23 – Ob river, Zaeltsovsky Bor; 24 – Inya river, opposite the spring no. 4; 25 – r. Inya, below the spring no. 1; 26 – r. Inya, closer to the Inskie springs (no. 1)

В сравнении с ними в Святом источнике в с. Верх-Тула, также приуроченном к отложениям юргинской свиты (D_3 jur), концентрации кальция только вдвое превышают концентрации натрия при соизмеримых отношениях натрия и магния к кремнию. Его отличают следующие значения коэффициентов: $\text{Ca}/\text{Na}=2,7$; $\text{Ca}/\text{Mg}=2,4$; $\text{Ca}/\text{Si}=15,9$; $\text{Mg}/\text{Si}=7,2$; $\text{Na}/\text{Si}=6,0$; $\text{Si}/\text{Na}=0,2$; $r\text{Na}/r\text{Cl}=22,3$ и $\text{SO}_4/\text{Cl}=3,0$. Воды Святого источника можно считать фоновыми. Они собственно пресные HCO_3 Na-Mg-Ca состава с величиной общей минера-

лизации от 587 до 686 mg/dm^3 , содержанием кремния 4,07–6,62 mg/dm^3 и органического углерода 0,4–1,7 mg/dm^3 . Воды нейтральные pH (7,4–7,5) с восстановительными условиями geoхимической среды с Eh от 66,7 до –44,9 мВ и содержанием O_2 раствор. 0,54–2,54 mg/dm^3 .

Изучение микрокомпонентного состава вод «Инских источников» показало корреляцию всех основных положительных и отрицательных пиков, за исключением урана и палладия, по сравнению с вмещающими породами. На спектре распределения хи-

мических элементов в водах наиболее высокие содержания ($\text{мг}/\text{дм}^3$) отмечаются у: Sr (до 0,54), Fe (до 0,18), В (до 0,03), Ba (до 0,02), Al (до $7,9 \cdot 10^{-2}$), Br (до $5,6 \cdot 10^{-2}$), I (до $8,1 \cdot 10^{-3}$), U (до $4,1 \cdot 10^{-3}$), а наиболее низкие у Pd (до $8,4 \cdot 10^{-6}$), Tm (до $1,2 \cdot 10^{-6}$), In (до $7,6 \cdot 10^{-7}$) и Bi (до $6,1 \cdot 10^{-7}$). В августе наблюдался рост концентраций от первого источника к четвертому по ($\text{мг}/\text{дм}^3$): Br до $4,2 \cdot 10^{-2}$, Li до $7,6 \cdot 10^{-3}$, U до $4,1 \cdot 10^{-3}$, Cu до $3,9 \cdot 10^{-4}$ и Th до $3,6 \cdot 10^{-6}$. В ноябре отмеченная тенденция сохраняется у Br, Li и U.

Активность ^{222}Rn в «Инских источниках» изменяется в диапазоне от 7 до 149 $\text{Бк}/\text{дм}^3$. Его вариация в источниках имеет следующий вид ($\text{Бк}/\text{дм}^3$): № 1 (66–112), № 2 (47–56), № 3 (7–20), № 4 (65–149). Связь с поверхностными водами в источнике № 3 подтверждается низкой активностью радона. Суммарная α -активность вод составляет 3–4 $\text{мБк}/\text{дм}^3$, а β -активность 11–15 $\text{мБк}/\text{дм}^3$. Природные радионуклиды содержатся в водах в следующих пределах ($\text{мг}/\text{дм}^3$): ^{238}U от $2,83 \cdot 10^{-3}$ до $4,13 \cdot 10^{-3}$; ^{232}Th от $2,39 \cdot 10^{-6}$ до $1,16 \cdot 10^{-5}$ и ^{226}Ra от $3,83 \cdot 10^{-10}$ до $4,93 \cdot 10^{-10}$. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношение в водах варьирует в интервале от $8,85 \cdot 10^{-4}$ до $3,61 \cdot 10^{-3}$, а в породах составляет 0,3–27,8, при среднем значении 14,0. Активность изотопов урана и радия составляет у ($\text{мБк}/\text{дм}^3$): ^{234}U (117–124), ^{238}U (38–48), ^{226}Ra (14–18) и ^{228}Ra (5,7–7,4). Уранизотопное отношение (γ) $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в «Инских источниках» варьирует в интервале от 2,6 до 3,2, что говорит о неглубокой циркуляции этих вод по сравнению с

водами Святого источника в с. Верх-Тула, в которых $\gamma=1,3$.

Анализ величин $\delta^{18}\text{O}$, δD вод в комплексе с $\delta^{13}\text{C}$ растворенной в водах углекислоты позволяет ответить на широкий спектр важных вопросов: генезис вод, их взаимодействие с окружением (газами и горными породами), протекание процессов водообмена [32]. При интерпретации данных по стабильной изотопии кислорода и водорода обычно оперируют глобальной (Global Meteoric Water Line – GMWL) и локальной (Local Meteoric Water Line – LMWL) линиями метеорных вод. Первая, предложенная Г. Крейгом [33], описывает глобальное среднегодовое соотношение между δD и $\delta^{18}\text{O}$ (рис. 2, a) в природных метеорных водах уравнением $\delta\text{D}=8,0 \cdot \delta^{18}\text{O}+10$. Линия LMWL, представляющая соотношение относительных концентраций указанных изотопов в заданной области, может существенно отличаться от GMWL. На момент исследования данные по значениям δD и $\delta^{18}\text{O}$ вод НГА очень ограничены [34, 35]. Они могут быть описаны уравнением $\delta\text{D}=7,5 \cdot \delta^{18}\text{O}-5$. Изотопный анализ отобранных образцов вод показал довольно широкую вариацию значений δD (от -139 до -113 ‰) и $\delta^{18}\text{O}$ (от -19 до -15 ‰). Для всех исследованных вод пары $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ располагаются между локальной и глобальной линиями метеорных вод (рис. 2, a). Это позволяет сделать вывод об инфильтрационном происхождении природных вод исследуемого региона.

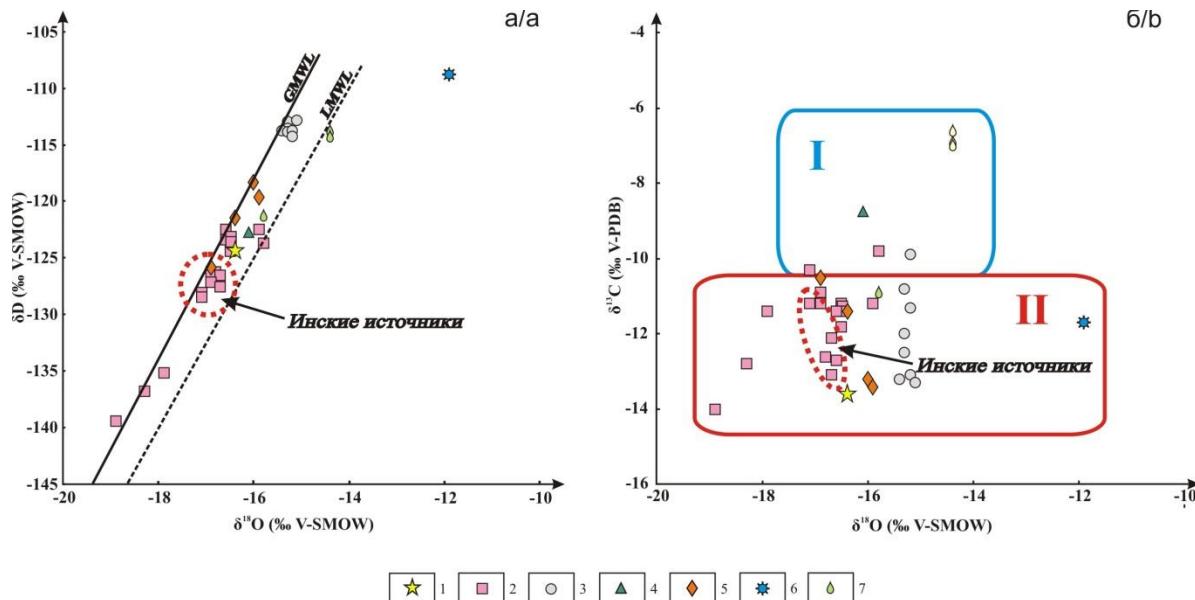


Рис. 2. Изотопный состав H и O (а/а), C и O (б/б) природных вод НГА: 1 – грунтовые воды покровных карбонатных отложений; 2 – воды зоны региональной трещиноватости; 3 – трещинно-жильные воды гранитоидов; 4 – трещинно-жильные воды гранитоидов в условиях антропогенного влияния; 5 – поверхностные воды; 6 – поверхности воды, подверженные влиянию процессов континентального засоления; 7 – поверхности воды в условиях антропогенного влияния

Fig. 2. Isotopic composition of δD and $\delta^{18}\text{O}$ (a/a), $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ (b/b) in natural waters of Novosibirsk city agglomeration: 1 – groundwater of drape carbonates; 2 – waters of the zone of regional fracturing; 3 – fractured vein waters of granitoids; 4 – fissure-vein waters of granitoids under conditions of anthropogenic influence; 5 – surface waters; 6 – surface waters affected by continental salinization; 7 – surface waters under conditions of anthropogenic influence

Данные по изотопному составу растворенного неорганического углерода вод, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, позволяют сделать выводы о взаимодействии вод с окружающей

средой, обнаружить вероятные источники DIC в водах, среди которых можно выделить гидролиз карбонат-содержащих пород, так называемый почвенный

СО₂, атмосферный диоксид углерода, а также органическую (биогенную) углекислоту [36, 37]. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ исследованных вод НГА варьируют в диапазоне от $-9,0$ до $-14,0\text{‰}$ (рис. 2, б). Согласно данным [38], значение $\delta^{13}\text{C}$ атмосферного CO₂ в широтах Новосибирской области, в зависимости от времени года, колеблется от $-8,0$ до $-9,0\text{‰}$. С учетом этого значения и обеднения соотношения $\delta^{13}\text{C}$ тяжелым изотопом на $1,2\text{‰}$ за счет фракционирования при переходе из атмосферного CO₂ в водорастворенную форму [39] ожидаемое значение $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ дождевой воды должно варьировать в диапазоне от $-9,2$ до $-10,2\text{‰}$. Очевидно, что ряд образцов (область I), представленных в настоящей работе, попадает в эти рамки и происхождение DIC этих вод, по-видимому, носит атмосферный характер.

Между тем большая часть представленных вод имеет более легкие изотопные отношения C_{DIC} (область II). Наиболее вероятным источником легких изотопов углерода в поверхностных водах представляется почвенная углекислота, сформированная в ходе биогенного распада углерод-содержащих органических остатков (в основном, растительного происхождения), содержащихся в почвах. В зависимости от доминирования растений с определенным типом фотосинтеза (C3 или C4) в исследуемом ареале изотопный состав углерода остатков этих растений может сильно варьировать. Согласно данным [36, 40], значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ в диапазоне от -9 до -14‰ характерны для вод, взаимодействующих с силикатными и карбонатными породами, содержащими остатки растений типа C3.

Изотопно-geoхимические особенности вмещающих пород

Вмещающие отложения впервые макроскопически описаны в составе верхней части верхнедевонской Инской формации, так называемых Шиферных слоев, в монографии А.И. Гусева [41]. Согласно опубликованным материалам, более детальных минералогопетрографических и geoхимических исследований по указанному объекту не проводилось.

Вмещающие породы представлены глинистыми, редко известково-глинистыми сланцами темно-серого (до черного), иногда серого (более светлые разновидности выветрелого облика) цвета, с небольшой примесью алевритового, песчано-алевритового материала (от первых % до 15 %) и тонко-микрокристаллического кальцита (первые %, иногда до 35–40 %). В разной степени (в основном незначительно) проявлены тонкодисперсное ОВ и пирит. Встречаются редкие включения окислов-гидроокислов железа и пятнистое ожелезнение вдоль плоскостей сколов. Характерны субпластичные и наклонные тонкие трещинки, выполненные кальцитом. В составе сланцев преобладающая глинистая часть представлена хорошо окристаллизованными слюдой мусковитового типа и, вероятно, парагонитом (от 25 до 45 %), Mg, иногда Fe-Mg хлоритом (5–20 %), установлены также кварц (20–35 %), полевые шпаты (10–25 %), кальцит. В качестве незначительных примесей отмечаются сидерит (?), пирит, пирротин, псиломелан (?), гранат, амфибол, цеолит (филлипсит).

Второй тип вмещающих пород представлен известняком (известковым туфом) светлым коричневато-серым, участками белесым, сильно пористым, натечной текстурой, микротовым, участками яснокристаллическим, с неравномерно распределенной незначительной примесью мелкоалевритового материала. По результатам электронномикроскопических исследований в составе примеси установлены альбит, калиевый полевой шпат, кварц, амфибол, апатит, эпидот, рутил, титанит, ильменит, магнетит, хлорит. Кальцит в почковидных микротовых образованиях имеет чистый состав, а в яснокристаллических участках в нем появляется небольшая примесь Mg (рис. 3, А, Б). В известково-глинистом сланце в кальците отмечена примесь Fe, Mg, Mn, Sr (рис. 3, В).

Изученный изотопный состав С и O кальцита вмещающих пород характеризуется близкими значениями для большей части образцов: $\delta^{13}\text{C}$ варьирует в узких пределах – от $-3,1$ до $-2,7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ – от $17,2$ до $18,4\text{‰}$ (рис. 4). Лишь для образца выветрелого глинистого сланца (№ 81б) отмечено облегчение изотопного состава как по углероду (до $-11,0\text{‰}$), так и по кислороду (до $13,9\text{‰}$). Также этот образец по результатам geoхимических исследований характеризуется существенным снижением (в несколько раз) содержания всех элементов-примесей (кроме U), свидетельствующим об активном проявлении процессов выщелачивания на отдельных участках разреза. В остальных образцах содержания элементов-примесей достаточно выдержаны. Спектры РЭ (нормирование относительно хондритовых метеоритов) характеризуются слабым отрицательным наклоном, фиксирующим относительное снижение тяжелых РЭ.

Заключение

Резюмируя вышеизложенное можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что воды «Инских источников» умеренно пресные HCO₃ Mg-Ca состава с величиной общей минерализации от 389 до 536 мг/дм³, содержанием кремния 4,14–8,61 мг/дм³ и органического углерода 0,3–1,5 мг/дм³. Они характеризуются pH от нейтральных до слабощелочных (7,1–8,4), окислительной геохимической обстановкой с Eh +205,3–+231,8 мВ и содержанием O₂ раст. 6,24–12,26 мг/дм³.
2. Активность ²²²Rn в «Инских источниках» изменяется в диапазоне от 7 до 149 Бк/дм³. Природные радионуклиды содержатся в водах (мг/дм³): ²³⁸U ($2,83 \cdot 10^{-3}$ – $4,13 \cdot 10^{-3}$); ²³²Th ($2,39 \cdot 10^{-6}$ – $1,16 \cdot 10^{-5}$) и ²²⁶Ra ($3,83 \cdot 10^{-10}$ – $4,93 \cdot 10^{-10}$). ²³²Th/²³⁸U отношение в водах составляет $8,85 \cdot 10^{-4}$ – $3,61 \cdot 10^{-3}$. ²³⁴U/²³⁸U в «Инских источниках» составляет от 2,6 до 3,2, что говорит о неглубокой циркуляции этих вод по сравнению с водами Святого источника в с. Верх-Тула, в которых $\gamma=1,3$.
3. По изотопному составу воды имеют инфильтрационное происхождение. Диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$ в водах меняется от $-17,1$ до $-16,7\text{‰}$ со значениями δD от $-128,4$ до $-126,2\text{‰}$ и вариацией $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ в интервале от $-13,1$ до $-10,3\text{‰}$.

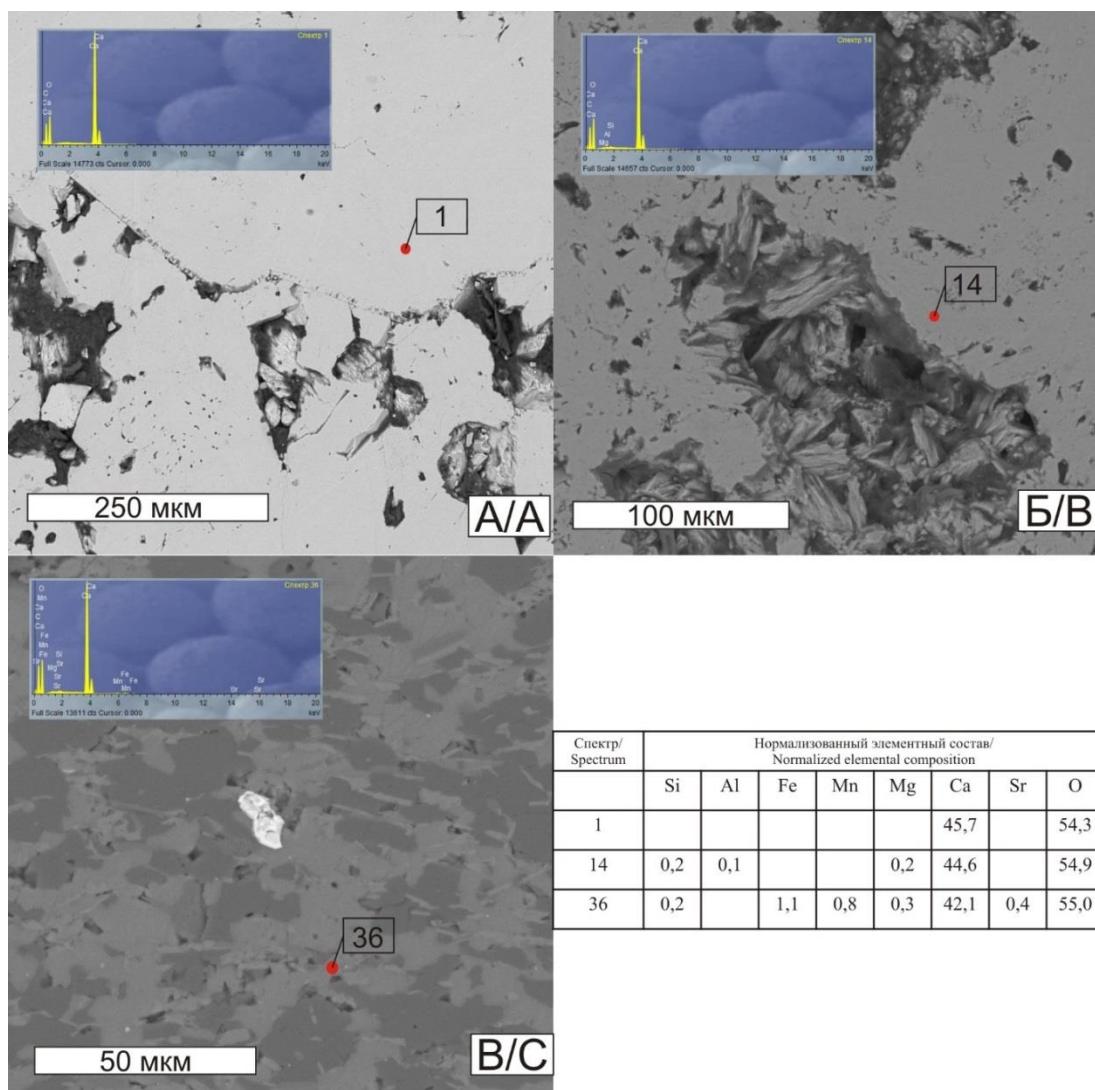


Рис. 3. Состав кальцита вмещающих пород «Инских источников» по результатам рентгеноспектрального микролитогического анализа: А, Б) известковый туф; В) кальцитизированный сланец

Fig. 3. Calcite composition of the host rocks of the Inskie springs according to the results of X-ray spectral microanalysis: A, B) calcareous tuff; C) calcified shale

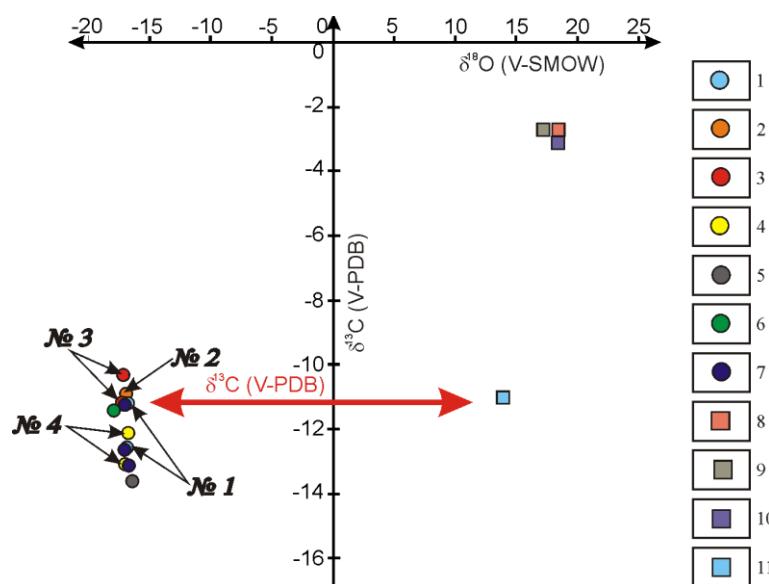


Рис. 4. Изотопный состав C_{DIC} и O в природных водах и породах «Инских источников»: 1 – № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – колодец; 6 – скважина; 7 – р. Иня, напротив источников; вмещающие породы: 8 – известково-глинистый сланец, 9 – известковый туф, 10 – сланец, 11 – выветрелый сланец

Fig. 4. Isotopic composition of C_{DIC} and O in natural waters and rocks of the Inskie springs: 1 – no. 1; 2 – no. 2; 3 – no. 3; 4 – no. 4; 5 – well; 6 – borehole; 7 – Inya river, opposite the spring; host rocks: 8 – calcareous clay shale, 9 – calcareous tuff, 10 – shale, 11 – weathered shale

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025 и Российского фонда фунда-

ментальных исследований и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-45-540004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахур А.Е. Интерпретация природных и техногенных радиоактивных аномалий в объектах окружающей среды // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 7. – С. 58–62.
2. Дойникова О.А., Тарасон Н.Н., Карташов П.М. Урановая минерализация палеодолинных месторождений Витима // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 12. – С. 24–30.
3. Четные изотопы урана в поверхностных водах группы малых озер северо-запада Архангельской области / Е.Н. Зыкова, С.Б. Зыков, Е.Ю. Яковлев, Н.С. Ларионов // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 4. – С. 114–120.
4. High radionuclides in groundwater of an inland basin from Northwest China: origin and fate / H. Guo, W. Zhao, H. Li, W. Xiu, J. Shen // ACS Earth and Space Chemistry. – 2018. – V. 2. – № 11. – P. 1137–1144.
5. Monged M.H.E., Hussein M.T., Khater A.E.M. Elemental and radiological aspects of geothermal springs and nearby soil and sediment of Al-Lith area: concentration and risk assessment // Environmental Earth Sciences. – 2018. – V. 77. – № 427.
6. Hydrogeochemical behavior of uranium and thorium in rock and groundwater samples from southeastern of El Baño Guanajuatense, Guanajuato, Mexico / J.I. Morales-Arredondo, M.A.A. Hernández, E. Hernández-Mendiola, R.E. Estrada-Hernández, O.M. Bermea // Environmental Earth Sciences. – 2018. – V. 77. – № 567.
7. Fan W., Hayes K.F., Ellis B.R. Estimating radium activity in shale gas produced brine // Environmental Science & Technology. – 2018. – V. 52. – P. 10839–10847.
8. Поведение изотопов ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U в процессах выветривания вулканических пород с урановой минерализацией (на примере месторождения Тулукуевское, Восточное Забайкалье) / И.В. Чернышев, В.Н. Голубев, А.В. Чугаев, Г.В. Манджиева, Б.И. Гареев // Петрология. – 2019. – Т. 27. – № 4. – С. 446–467.
9. Plant-soil-water interactions: implications from U-Th-Ra isotope analysis in soils, soil solutions and vegetation (Strengbach CZO, France) / F. Chabaux, P. Stille, J. Prunier, S. Gangloff, D. Lemarchand, G. Morvan, J. Nágrel, E. Pelt, M.-C. Pierret, S. Rihs, A.-D. Schmitt, M. Trémolières, D. Viville // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2019. – V. 259. – P. 188–210.
10. Dhurandhar A.P., Ranjan R. Imaging and integration of hydrogeochemical data for characterization of groundwater quality around Jabalpur, India // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – V. 79. – P. 109–131.
11. Environmental assessment of radionuclides levels and some heavy metals pollution along Gulf of Suez, Egypt / H.M. Diab, A. Ramadan, M.H.E. Monged, M. Shahin // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – V. 26. – P. 12346–12358.
12. Embaby A., Redwan M. Sources and behavior of trace elements in groundwater in the South Eastern Desert, Egypt // Environmental Monitoring and Assessment. – 2019. – V. 191. – № 686.
13. Radioactivity of Mt. Etna volcano and radionuclides transfer to groundwater / B. Kozlowska, A. Walencik-Lata, S. Giannanco, G. Immè, R. Catalano, G. Mangano // Annals of geophysics. – 2019. – V. 62. – № 5. – VO565.
14. Radium isotopes to trace uranium redox anomalies in anoxic Groundwater / L. Krall, L. Auqué-Sanz, J. García-Orellana, G. Trezzi, E.-L. Tullborg, J. Suksi, D. Porcelli, P. Andersson // Chemical Geology. – 2019. – V. 531. – № 119296.
15. Fractionation of rare earth elements (REEs) and actinides (U and Th) originating from acid thermal water during artificial and natural neutralization processes of surface waters / Y. Ogawa, D. Ishiyama, N. Shikazono, K. Iwane, T. Hoshino, M. Kajiwara, N. Tsuchiya, B. Saini-Eiduka, S.A. Wood // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2019. – V. 249. – P. 247–262.
16. The aqueous chemistry of polonium (Po) in environmental and anthropogenic processes / R. Rama, J. Vaughanb, B. Etschmann, J. Brugger // Journal of Hazardous Materials. – 2019. – V. 380. – № 120725.
17. Yazdizade B., Jafari H., Bagheri R. Geochemical controls on the distribution of radio-trace elements in groundwater resources of Shir-Kuh granitoid aquifer, central Iran // Hydrology Research. – 2019. – V. 50. – № 3. – P. 974–989.
18. Physico-chemical conditions controlling the radionuclides mobilisation in various granitic environments / A.M. El-Mezayen, E.M. Ibrahim, M.G. El-Feky, S.M. Omar, A.M. El-Shabasy, S.A. Taalab // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2020. – P. 1–17.
19. Faraj T., Ragab A., Alfyl M.E. Geochemical and hydrogeological factors influencing high levels of radium contamination in groundwater in arid regions // Environmental Research. – 2020. – V. 184. – № 109303.
20. Geochemical controls on dispersion of U and Th in Quaternary deposits, stream water, and aquatic plants in an area with a granite pluton / C. Yu, T. Berger, H. Drake, Z. Song, P. Peltola, M.E. Åström // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 663. – P. 16–28.
21. Geochemical and isotopic (U, Th) variations in lake waters in the Qinghai Lake Basin, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China: origin and paleoenvironmental implications / P. Zhang, H. Cheng, W. Liu, L. Mo, X. Li, Y. Ning, M. Ji, B. Zong, C. Zhao // Arabian Journal of Geosciences. – 2019. – V. 12. – № 92.
22. Distribution characteristics and influencing factors of uranium isotopes in saline lake waters in the northeast of Qaidam Basin / C. Zhao, P. Zhang, X. Li, Y. Ning, L. Tan, R.L. Edwards, X. Yao, H. Cheng // Minerals. – 2020. – V. 10. – № 74.
23. Гусев В.К., Вериго Е.К. Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана // Изменение природных условий под влиянием деятельности человека. – 1984. – С. 99–107.
24. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрохимия и гидрохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радионуклидов вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
25. Новиков Д.А., Деркачев А.С., Сухорукова А.Ф. Гидрохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радионуклидов вод // Интерэкско Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 125–132.
26. Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1172. – № 012096.
27. Корнеева Т.В., Новиков Д.А. Формы миграции химических элементов в радионуклидных водах месторождения «Горводолечебница» (г. Новосибирск) // Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2020. – № 17. – С. 287–291.
28. 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 Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1451 (1). – № 012007.
29. Первые результаты комплексных изотопно-гидрохимических исследований природных вод Новосибирской городской агломерации / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, А.Ф. Сухорукова // Интерэкско ГЕО-Сибирь – Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика, Геоэкология: Материалы XVI международной научной конференции. – Новосибирск, 20–24 апреля 2020. – С. 179–194.
30. 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 четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. – Улан-Удэ, 17–20 августа 2020. – С. 88–92.
31. Novikov D.A., Dultsev F.F., Kamenova-Totzeva R., Korneeva T.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky–Mochishche zone of Novosibirsk, Russia // Environmental Earth Sciences. – 2021. – V. 80. – № 216.
32. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросфера. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
33. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
34. Первые данные по изотопному составу пластовых вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев,

- С.В. Рыжкова // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 59–72.
35. The GNIP Database. URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser> (дата обращения 10.08.2020).
36. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: Sources of DIC and their magnitudes // Earth and Planetary Science Letters. – 2005. – V. 236. – P. 419–429.
37. Deirmendjian L., Abril G. Carbon dioxide degassing at the groundwater-stream-atmosphere interface: isotopic equilibration and hydrological mass balance in a sandy watershed // Journal of Hydrology. – 2018. – V. 558. – P. 129–143.
38. Лаборатория глобальных наблюдений. URL: <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/iadv/> (дата обращения 10.08.2020).
39. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO₂ // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – Iss. 1. – P. 107–114.
40. O, H, C isotope geochemistry of carbonated mineral springs in central Victoria, Australia: sources of gas and water–rock interaction during dying basaltic volcanism / I. Cartwright, T. Weaver, S. Tweed, D. Ahearn, M. Cooper, C. Czapnik, J. Tranter // Journal of Geochemical Exploration. – 2000. – V. 69–70. – P. 257–261.
41. Гусев А.И. Геологическое строение и полезные ископаемые района г. Новосибирска. Томск: Изд-во Западно-Сибирского Геолого-гидро-геодезического треста, 1934. – 101 с.

Поступила: 14.08.2020 г.

Информация об авторах

Новиков Д.А., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Копылова Ю.Г., кандидат геолого-минералогических наук, главный инженер проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Вакуленко Л.Г., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Сухорукова А.Ф., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Пыряев А.Н., кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории изотопно-аналитической геохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; ассистент кафедры химической и биологической физики Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

Максимова А.А., студент Новосибирского национального исследовательского университета.

Дульцев Ф.Ф., научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Черных А.В., научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 556.332.52(571.1)

ISOTOPE GEOCHEMICAL FEATURES OF OCCURRENCE OF LOW-RADON WATERS «INSKIE SPRINGS» (SOUTH-WESTERN SIBERIA)

Dmitry A. Novikov^{1,2},
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Yulia G. Kopylova³,
unpc_voda@mail.ru

Lyudmila G. Vakulenko^{1,2},
Vakulenolg@ipgg.sbras.ru

Anna F. Sukhorukova^{1,2},
SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

Aleksandr N. Pyrayev^{4,2},
pyrayev@igm.nsc.ru

Anastasia A. Maksimova²,
rock.nastaya64@gmail.com

Fedor F. Dultsev¹,
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Anatoliy V. Chernykh¹,
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3/6, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Novosibirsk State University,
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

⁴ Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia

The relevance of the research lies in obtaining the first isotope-geochemical data on natural waters and host rocks of the «Inskie springs» occurrence of low-radon waters.

The aim of the research is to study the peculiarities of chemical composition of natural waters and water-bearing rocks and obtain the first information on the total α - and β -activity of natural waters, the activity of ^{222}Rn and the isotopic composition of δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra and ^{228}Ra .

Methods. Sampling was carried out in accordance with generally accepted techniques. Laboratory study of the chemical composition by titrimetry, ion chromatography, inductively coupled plasma mass spectrometry was carried out at the Problem Research Laboratory of Hydrogeochemistry of the TPU School of Natural Resources. The analysis of the complex of isotopic ratios δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of waters and dissolved inorganic carbon was carried out at the Center for Collective Use of the IGM SB RAS using the Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253. Data on the total α - and β -activity of natural waters, as well as the activities of ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra and ^{228}Ra were obtained using gamma and alpha spectrometry (after preliminary radiochemical sample preparation).

Results. In 2019, 35 km from Novosibirsk, far from the known granite massifs, the «Inskie springs» occurrence of low-radon waters was discovered, referring to the waters of the regional fracture zone. The work presents the first results of their geochemical studies. The waters are moderately fresh $\text{HCO}_3 \text{ Mg-Ca}$ with a total mineralization from 389 to 536 mg/dm³ with a silicon content of 4,14–8,61 mg/dm³. They are characterized by pH from neutral to slightly alkaline (7,1–8,4), oxidative geochemical environment with Eh +205,3 →+231,8 mV and $\text{O}_2\text{dissolved}$ content of 6,24–12,26 mg/dm³. The activity of ^{222}Rn varies in the range of 7–149 Bq/dm³; contents: ^{238}U from $2,83 \cdot 10^{-3}$ to $4,13 \cdot 10^{-3}$ mg/dm³ and ^{232}Th from $2,39 \cdot 10^{-6}$ to $1,16 \cdot 10^{-5}$ mg/dm³. According to the isotopic composition, the origin of water is infiltration. The range of $\delta^{18}\text{O}$ values in waters varies from -17,1 to -16,7 ‰ with δD values from -128,4 to -126,2 ‰ and $\delta^{13}\text{C}$ variation is in the range of -13,1 to -10,3 ‰. The host rocks are dark gray (to black) shales, sometimes gray, with a small admixture of silty and sandy-silty material. The isotopic composition of calcite in the host rocks is characterized by similar values: $\delta^{13}\text{C}$ varies from -3,1 to -2,7 ‰, $\delta^{18}\text{O}$ – from 17,2 to 18,4 ‰. Weathered clay shales are characterized by lower contents of $\delta^{13}\text{C}$ (up to -11,0 ‰) and $\delta^{18}\text{O}$ (up to 13,9 ‰). Also, according to the results of geochemical studies, these samples are characterized by a significant decrease in the content of all trace elements (except for U), which indicates active interaction of waters with the host rocks.

Key words:

Radon waters, stable isotope, uranium-isotope ratio, uranium, radium, radon, new occurrence of radon waters «Insky spring», Novosibirsk urban agglomeration, Western Siberia.

The research was financially supported by the FSR no. 0331-2019-0025 and the Russian Foundation for Basic Research as part of the scientific project no. 19-45-540004.

REFERENCES

1. Bakur A.E. Interpreting technogenic and nontechnogenic radioactive anomalies in environmental objects. *Prospect and protection of mineral resources*, 2018, no. 7, pp. 58–62. In Rus.
2. Doynikova O.A., Tarasov N.N., Kartashov P.M. Uranium mineralization of Vitim paleovalleys deposits. *Prospect and protection of mineral resources*, 2018, no. 12, pp. 24–30. In Rus.
3. Zykova E.N., Zykov S.B., Yakovlev E.Yu., Larionov N.S. Evolutionary isotopes of uranium in surface waters of the group of small lakes of the northwest of the Arkhangelsk region. *Advances in current natural sciences*, 2018, no. 4, pp. 114–120. In Rus.
4. Guo H., Zhao W., Li H., Xiu W., Shen J. High radionuclides in groundwater of an inland basin from Northwest China: Origin and fate. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2018, vol. 2, no. 11, pp. 1137–1144.

5. Monged M.H.E., Hussein M. T., Khater A.E.M. Elemental and radiological aspects of geothermal springs and nearby soil and sediment of Al-Lith area: concentration and risk assessment. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, no. 427.
6. Morales-Arredondo J.I., Hernández M.A.A., Hernández-Mendiola E., Estrada-Hernández R.E., Bermea O.M. Hydrogeochemical behavior of uranium and thorium in rock and groundwater samples from southeastern of El Bajío Guanajuatense, Guanajuato, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 2018, vol. 77, no. 567.
7. Fan W., Hayes K.F., Ellis B.R. Estimating radium activity in shale gas produced brine. *Environmental Science & Technology*, 2018, vol. 52, pp. 10839–10847.
8. Chernyshev I.V., Golubev V.N., Chugaev A.V., Mandzhieva G.V., Gareev B.I. Behavior of the ^{238}U , ^{235}U , and ^{234}U isotopes at weathering of volcanic rocks with U mineralization: a case study at the Tulukuevskoe deposit, eastern Transbaikalia. *Petrology*, 2019, vol. 27, no. 4, pp. 407–424. In Rus.
9. Chabaux F., Stille P., Prunier J., Gangloff S., Lemarchand D., Morvan G., Nárgel J., Pelt E., Pierret M.-C., Rihs S., Schmitt A.-D., Trémolières M., Viville D. Plant-soil-water interactions: Implications from U-Th-Ra isotope analysis in soils, soil solutions and vegetation (Strengbach CZO, France). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, vol. 259, pp. 188–210.
10. Dhurandhar A.P., Ranjan R. Imaging and integration of hydrogeochemical data for characterization of groundwater quality around Jabalpur, India. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 79, pp. 109–131.
11. Diab H.M., Ramadan A., Monged M.H.E., Shahin M. Environmental assessment of radionuclides levels and some heavy metals pollution along Gulf of Suez, Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, pp. 12346–12358.
12. Embaby A., Redwan M. Sources and behavior of trace elements in groundwater in the South Eastern Desert, Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, vol. 191, no. 686.
13. Kozłowska B., Walencik-Lata A., Giannamico S., Immè G., Catalano R., Mangano G. «Radioactivity of mt. Etna volcano and radionuclides transfer to groundwater». *Annals of geophysics*, 2019, vol. 62, no. 5, VO565.
14. Krall L., Auqué-Sanz L., Garcia-Orellana J., Trezzi G., Tullborg E.-L., Suksi J., Porcelli D., Andersson P. Radium isotopes to trace uranium redox anomalies in anoxic Groundwater. *Chemical Geology*, 2019, vol. 531, no. 119296.
15. Ogawa Y., Ishiyama D., Shikazono N., Iwane K., Hoshino T., Kajiwara M., Tsuchiya N., Saini-Eiduka B., Wood S.A. Fractionation of rare earth elements (REEs) and actinides (U and Th) originating from acid thermal water during artificial and natural neutralization processes of surface waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, vol. 249, pp. 247–262.
16. Rama R., Vaughan B., Etschmann B., Brugger J. The aqueous chemistry of polonium (Po) in environmental and anthropogenic processes. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, vol. 380, no. 120725.
17. Yazdizadeh B., Jafari H., Bagheri R. Geochemical controls on the distribution of radio-trace elements in groundwater resources of Shir-Kuh granite aquifer, central Iran. *Hydrology Research*, 2019, vol. 50, no. 3, pp. 974–989.
18. El-Mezayen A.M., Ibrahim E.M., El-Feky M.G., Omar S.M., El-Shabasy A.M., Taalab S.A. Physico-chemical conditions controlling the radionuclides mobilisation in various granitic environments. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2020, pp. 1–17.
19. Faraj T., Ragab A., Alfyl M.E. Geochemical and hydrogeological factors influencing high levels of radium contamination in groundwater in arid regions. *Environmental Research*, 2020, vol. 184, no. 109303.
20. Yu C., Berger T., Drake H., Song Z., Peltola P., Åström M.E. Geochemical controls on dispersion of U and Th in Quaternary deposits, stream water, and aquatic plants in an area with a granite pluton. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 663, pp. 16–28.
21. Zhang P., Cheng H., Liu W., Mo L., Li X., Ning Y., Ji M., Zong B., Zhao C. Geochemical and isotopic (U, Th) variations in lake waters in the Qinghai Lake Basin, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China: origin and paleoenvironmental implications. *American Journal of Geosciences*, 2019, vol. 12, no. 92.
22. Zhao C., Zhang P., Li X., Ning Y., Tan L., Edwards R.L., Yao X., Cheng H. Distribution Characteristics and Influencing Factors of Uranium Isotopes in Saline Lake Waters in the Northeast of Qaidam Basin. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 74.
23. Gusev V.K., Verigo E.K. Radonovye vody Kolyvan-Tomskoy skladchatoy zony, ikh ispolzovanie i okhrana [Radon waters of the Kolyvan-Tomsk folded zone, their use and protection]. *Izmenenie prirodnykh usloviy pod vliyaniem deyatelnosti cheloveka*, 1984, pp. 99–107.
24. Novikov D.A., Sukhorukova A.F., Korneeva T.V. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the Zaeltsovsko-Mochishchensky zone of radon waters in the southern West Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1255–1274. In Rus.
25. Novikov D.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F. Hydrogeochemistry of the Zaeltsovsky-Mochishche field of radon waters. *Interexpo GEO-Siberia*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 125–132. In Rus.
26. 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, no. 012096.
27. Korneeva T.V., Novikov D.A. Migration forms of chemical elements in radon waters of the Gorvodolechebnitsa field. Novosibirsk. *Proceedings of the Fersmanov Scientific Session of the State Institute of the KSC RAS*, 2020, no. 17, pp. 287–291. In Rus.
28. 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 Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia). *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1451 (1), no. 012007.
29. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F. Pervye rezul'taty izotopno-gidrogeokhimicheskikh issledovanii prirodnykh vod Novosibirskoy gorodskoy aglomeratsii [The first results of integrated isotope-hydrogeochemical studies of natural waters in the Novosibirsk urban agglomeration]. *Interexpo GEO-Sibir. Nedropolzovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopаемых. Ekonomika. Geokologiya. Materialy XVI mezdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Interexpo GEO-Siberia. Subsoil use. Mining. Directions and technologies of prospecting, exploration and development of mineral deposits. Economy. Geology. Proc. of the XVI International Scientific Conference]. Novosibirsk, April 20–24, 2020. pp. 179–194.
30. Novikov D.A., Vakulenko L.G., Sukhorukova A.F. Geokhimiya sistemy voda–poroda pravleniya slaboradonovyykh vod «Inskie isrochini» [Geochemistry of the water–rock system of weak hydro–radon occurrence «Inskie springs» (south of Western Siberia)]. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami. Materialy chetvertoy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Water–rock interaction: geological evolution. Proc. of the fourth All-Russian scientific conference with international participation]. Ulan-Ude, 17–20 August 2020. pp. 88–92.
31. Novikov D.A., Dultsev F.F., Kamenova-Totzeva R., Korneeva T.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky–Mochishche zone of Novosibirsk, Russia. *Environmental Earth Sciences*, 2021, vol. 80, no. 216.
32. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery* [Isotopy of the hydrosphere]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 632 p.
33. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
34. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ryzhkova S.V. The first data on the isotopic composition of stratal waters of the developed oil fields in Novosibirsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 59–72. In Rus.
35. The GNIP Database. Available at: <https://nucleus.iaea.org/wiser> (accessed 10 August 2020).
36. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, vol. 236, pp. 419–429.
37. Deirmendjian L., Abril G. Carbon dioxide degassing at the groundwater-stream-atmosphere interface: isotopic equilibration and hydrological mass balance in a sandy watershed. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 558, pp. 129–143.

38. *Laboratoriya globalnykh nablyudeny* [Global Monitoring Laboratory]. Available at: <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/fadv/> (accessed 10 August 2020).
39. 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, pp. 107–114.
40. Cartwright I., Weaver T., Tweed S., Ahearne D., Cooper M., Czapnik C., Tranter J. O, H, C isotope geochemistry of carbonated mineral springs in central Victoria, Australia: sources of gas and water–rock interaction during dying basaltic volcanism. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, vol. 69–70, pp. 257–261.
41. Gusev A.I. *Geologicheskoe stroyenie i poleznye iskopayemye rayona g. Novosibirска* [Geological structure and minerals of the region of Novosibirsk]. Tomsk, West Siberian Geological-Hydro-Geodetic Trust Publ., 1934. 101 p.

Received: 14 August 2020.

Information about the authors

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

Yulia G. Kopylova, Cand. Sc., senior scientific laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

Lyudmila G. Vakulenko, leading researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

Anna F. Sukhorukova, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

Aleksandr N. Pyrayev, Cand. Sc., researcher, Institute of Geology and Mineralogy of SB of RAS, assistant, Novosibirsk State University.

Anastasia A. Maksimova, student, Novosibirsk State University.

Fedor F. Dultsev, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

Anatoliy V. Chernykh, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.