

УДК 551.464.3 (1-924.71)

ОБ ОТКРЫТИИ СЛАБОРАДОНОВЫХ ВОД – СЕДОВА ЗАИМКА

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

Пыряев Александр Николаевич^{3,2},
pyrayev@igm.nsc.ru

Максимова Анастасия Алексеевна^{2,1},
rock.nastaya64@gmail.com

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

Дульцев Федор Федорович¹,
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Деркачев Антон Сергеевич²,
a.derkachev@g.nsu.ru

Черных Анатолий Витальевич¹,
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Хвещевская Альбина Анатольевна⁴,
unpc_voda@mail.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 Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования заключается в получении актуальных изотопно-геохимических данных о природных водах и вмещающих горных породах проявления радоновых вод Седова Заимка.

Цель: изучить особенности химического состава природных вод и водовмещающих пород и получить первые сведения по активности ²²²Rn и изотопному составу δD, δ¹⁸O, δ¹³C, ²³⁴U, ²³⁸U, ²²⁶Ra и ²²⁸Ra.

Методы. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Определение комплекса величин δD, δ¹⁸O, δ¹³C_{DIC} вод и растворенного неорганического углерода (Dissolved Inorganic Carbon (DIC)) проводилось в центре коллективного пользования ИГМ СО РАН с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan™ MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device (для определений δD) и GasBench II (для определений δ¹⁸O и δ¹³C_{DIC}). Измерение содержаний ²²²Rn в водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН. Данные по общей β-активности вод, а также активностях ²³⁴U, ²³⁸U, ²²⁶Ra и ²²⁸Ra получены после предварительной радиохимической пробоподготовки на альфа-спектрометре ALPHA-ENSEMBLE-8 (Ametek, ORTEC, США); гамма-спектрометрической системе, скомпонованной на базе колодезного коаксиального HPGe ППД с низкофоновым кристаллом EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA фирмы EURISYS MEASURES (Франция) и альфа-бета радиометре для измерения малых активностей УМФ-2000 с кремниевым детектором (НПО «Доза», Россия). Разделение данных на однородные геохимические совокупности выполнено с помощью коэффициентов Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si. Для выявления степени концентрирования химических элементов в природных водах были рассчитаны коэффициенты концентрации $K_k = \frac{m_k}{n_k}$ и водной миграции (по А.И. Перельману) $K_{x1} = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$.

Результаты. Открыто проявление радоновых вод Седова Заимка, и впервые выполнены комплексные изотопно-геохимические исследования. Радоновые воды (активность ²²²Rn до 428 Бк/дм³) в основном характеризуются HCO₃ Mg-Na-Ca составом с величиной общей минерализации от 158 до 581 мг/дм³ и содержанием кремния от 4,34 до 30,84 мг/дм³. Геохимические параметры среды варьируют от восстановительной до окислительной обстановки с величинами Eh от –40,2 до +28,4 мВ; pH от 7,5 до 7,6 и O₂раств. от 2,99 до 5,24 мг/дм³. Значения геохимических коэффициентов составляют: Ca/Na 77,17; Ca/Mg 6,63; Ca/Si 11,42; Mg/Si 1,48; Na/Si 0,92; Si/Na 15,34; rNa/Cl 2,12; SO₄/Cl 4,02, что закономерно указывает на процессы формирования химического состава радоновых вод во вмещающих породах преимущественно алюмосиликатного состава. Среди микрокомпонентов наиболее высокими средними содержаниями выделяются (мг/дм³): Si=17,77; Fe=1,18; Mn=0,16; Zn=0,020 и W=0,0036. Значимых коэффициентов концентрации микрокомпонентов не выявлено. Сильной миграционной способностью в растворе обладает Sr, средней – Si, Mn, Ba, Cs и U. Суммарная β-активность вод составляет 32 мБк/дм³. Содержания природных радионуклидов варьируют (мг/дм³): ²³⁸U от 3,91·10⁻⁴ до 6,39·10⁻⁴; ²³²Th от 6,02·10⁻⁶ до 2,37·10⁻⁵ и ²²⁶Ra от 6,66·10⁻¹¹ до 1,09·10⁻¹⁰. ²³²Th/²³⁸U отношение в водах изменяется от 1,02·10⁻² до 3,71·10⁻², что является следствием окислительной геохимической обстановки, в которой торий не мигрирует. Уранизотопное отношение (γ) ²³⁴U/²³⁸U составляет 5,75 при активности изотопов урана (мБк/дм³): ²³⁴U (115±7), ²³⁸U (20±2), что указывает на неглубокую циркуляцию изученных вод. Активность изотопов радия в водах равна у ²²⁶Ra 70±7, а у ²²⁸Ra 51,8±3,9 мБк/дм³. Отношение ²²⁶Ra/²²⁸Ra в HCO₃ Mg-Na-Ca радоновых водах составляет 1,35. Изотопный состав радоновых вод (от –126,3 до –121,1 ‰ для δD и от –16,8 до –16,3 ‰ для δ¹⁸O) указывает на их метеорно-инфильтрационное происхождение. Изотопный состав углерода δ¹³C_{DIC} указывает на биогенное происхождение углекислоты и ее участие в процессе карбонат-силикатного выветривания пород.

Ключевые слова:

Радоновые воды, стабильные изотопы, радионуклиды, генезис вод, граниты, новое проявление радоновых вод Седова Заимка, Западная Сибирь.

Введение

На территории Новосибирской области (НСО) радоновые воды пользуются широким распространением и начало их изучению было положено в связи с массовыми поисками урана в Советском Союзе. Эти исследования проводились СУ «Енисейстрой» МВД СССР начиная с 1945 г. и в дальнейшем связаны с работами Березовской экспедиции. Их результатом стало открытие в 30 км севернее города Новосибирска месторождения урана Пригородное с прогнозными ресурсами около 1 тыс. т [1–3]. Степень изученности радоновых вод НСО находится на низком уровне, что отмечалось ранее в работах Е.В. Посохова, Н.И. Толстихина, В.К. Гусева, Е.К. Вериги, Ю.Н. Варакина, Н.А. Рослякова, В.В. Быковой и других [4–8]. В последние годы изуче-

ние аспектов формирования состава подземных вод НСО различного изотопно-геохимического облика ведется в ИНГТ СО РАН. Радоновые воды широко распространены на Земле, активность радона достигает 182000 Бк/дм^3 [9–20]. Поэтому получение актуальных сведений об их химическом и изотопном составе представляет весьма актуальное направление исследований. В период с 2018 по 2021 гг. в НСО были открыты новые проявления радоновых вод: Инские источники, Скалинское, Новобибеевское и Седова Заимка. Первые три описаны нами ранее [21–26]. В этой связи целью настоящей работы является представление первых результатов комплексных изотопно-геохимических исследований проявления радоновых вод Седова Заимка (рис. 1, а).

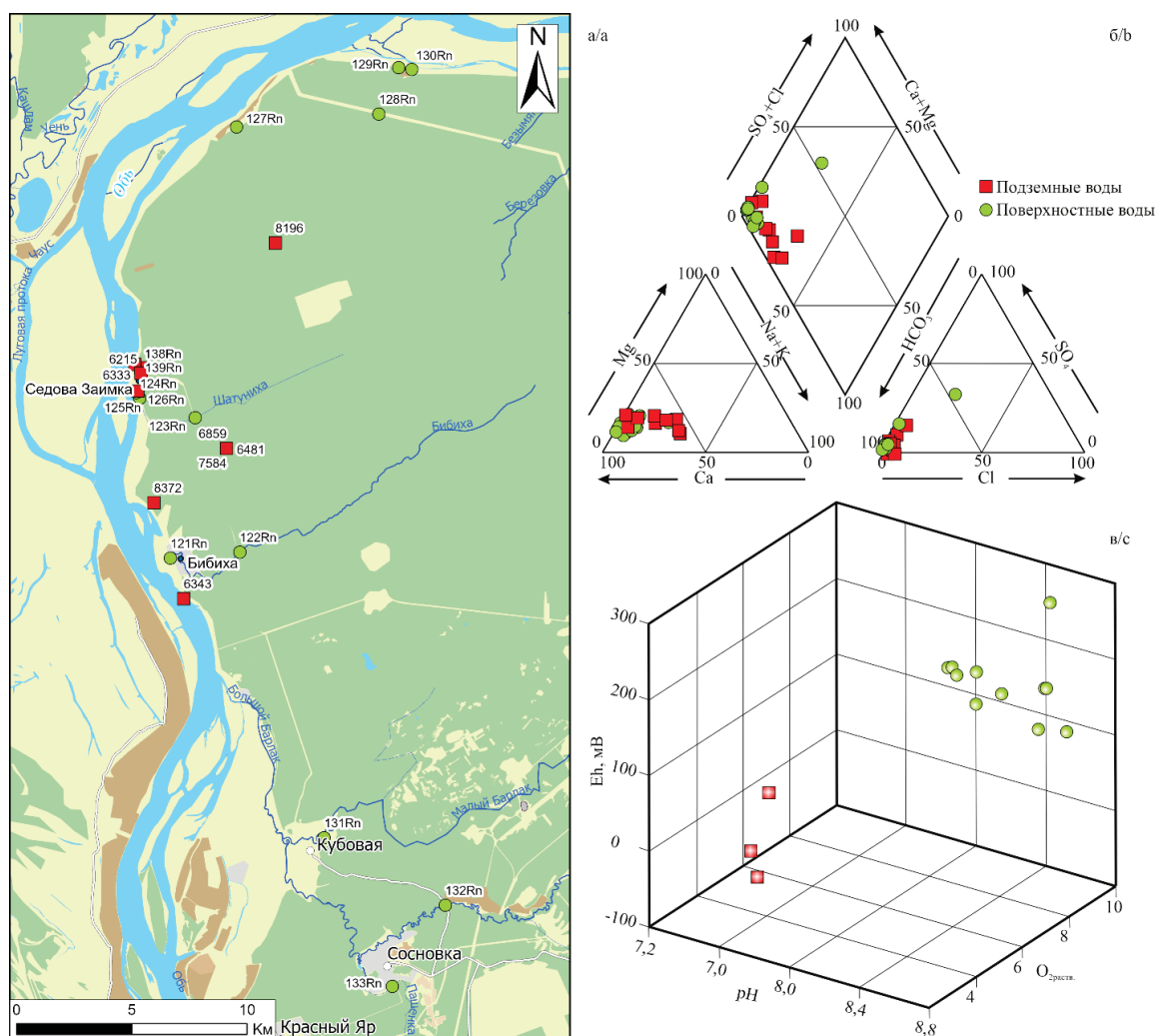


Рис. 1. Местоположение объектов исследования (а), диаграмма Пайпера химического состава изученных вод (б), быстроизменяющиеся геохимические параметры среды (в). Поверхностные воды: р. Бибиха – 121Rn, 122Rn; р. Шатуниха – 123Rn, 124Rn; р. Обь – 125Rn; р. Безымянная – 127Rn; р. Смородинка – 128Rn, 129Rn; р. Ключевая – 130Rn; р. Малый Барлак – 131Rn; р. Большой Барлак – 132Rn; р. Пашенка – 133Rn; подземные воды: 126Rn – скв. водопроводная глубиной 110 м; 138Rn – скв. 1 глубиной 110 м; 139Rn – скв. 2 глубиной 10 м; 7584; 6343; 8372; 6859; 6481; 6215; 6333 – разведочные скважины глубиной от 25 до 140 м

Fig. 1. Location of objects of study (a), Peiper diagram of the chemical composition of the studied waters (b), dependence of geochemical parameters on each other (c). Surface water: r. Bibikha – 121Rn, 122Rn; r. Shatunikhka – 123Rn, 124Rn; r. Ob – 125Rn; r. Bezmyannaya – 127Rn; r. Smorodinka – 128Rn, 129Rn; r. Klyuchevaya – 130Rn; r. Maly Barlak – 131Rn; r. Bolshoy Barlak – 132Rn; r. Pashenka – 133Rn; groundwaters: 126Rn – well tap water, depth 110 m; 138Rn – well 1, depth 110 m; 139Rn – well 2, depth 10 m; 7584; 6343; 8372; 6859; 6481; 6215; 6333 – exploratory wells with a depth from 25 to 140 m

Материалы и методы

В полевой сезон 2020 г. было отобрано 15 проб природных вод на территории Кубовинского сельсовета. Лабораторное изучение их химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ [24]. Название химического типа воды дано в соответствии с формулой М.Г. Курлова (более 10 %-экв) по отчетному принципу от меньшего к большему.

Анализ изотопного состава вод (δD и $\delta^{18}O$) и DIC ($\delta^{13}C_{DIC}$) выполнялся с помощью масс-спектрометра изотопных отношений FinniganTM MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II, в Аналитическом центре МИИ Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. Исследования проводили с использованием известных методик [27–30]. Все измерения проводились относительно материалов сравнения МАГАТЭ: NBS-18 и NBS-19 – при измерениях $\delta^{13}C_{DIC}$; VSMOW2, SLAP2 и GISP – при измерениях δD и $\delta^{18}O$ [31]. Погрешность измерений не превышала 0,1 ‰ при анализе изотопного состава углерода, 0,2 ‰ – кислорода и 2 ‰ – водорода.

Измерение активности ^{222}Rn в водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГ СО РАН. Исследования по общей β -активности вод, а также активностях ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra и ^{228}Ra выполнены в Аналитическом центре МИИ Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН после предварительной радиохимической пробоподготовки на альфа-спектрометре ALPHA-ENSEMBLE-8 (Ametek, ORTEC, США); гамма-спектрометрической системе, сконструированной на базе колодезного коаксиального HPGe ППД с низкофоновым криостатом EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA фирмы EURISYS MEASURES (Франция) и альфа-бета радиометре для измерений малых активностей УМФ-2000 с кремниевым детектором (НПО «Доза», Россия) [24].

Разделение данных на однородные геохимические совокупности по процессам формирования состава с оценкой интенсивности их проявления выполнено на основе соотношения химических элементов в водах. Коэффициенты 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; $SO_4/Cl \gg 1$ и $rNa/rCl \gg 1$ – гидролиза алюмосиликатов и окисления сульфидных минералов; пропорциональное увеличение значений $SO_4/Cl=1$, $rNa/rCl \geq 1$, $Ca/Na > 0$ – испарительного концентрирования [24].

Для выявления степени концентрирования химических элементов в природных водах были рассчитаны коэффициенты концентрации (Kk_i) и водной миграции по А.И. Перельману (Kx_1) [32]. Первый рассчитывается как: $Kk_i = \frac{m_x}{n_x}$, где m_x – содержание элемента в воде; n_x – содержание элемента во вмещающих породах в г/т. Второй: $Kx_1 = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$, где m_x – со-

держание элемента в воде (мг/дм³); a – минерализация (мг/дм³) и n_x – содержание элемента во вмещающих породах в %.

Результаты и обсуждение

Геологические условия

Территория исследования относится к Новосибирской зоне Обь-Зайсанской складчатой области герцинид [33]. На большей части территории развит Барлакский гранит-лейкогранитовый мезоабиссальный комплекс ($T_{1.2b}$), который представлен двумя фазами внедрения. Первая фаза представлена штокообразными телами и сложена среднезернистыми биотитовыми монцолейкогранитами ($\epsilon\gamma T_{1-2b1}$), в то время как вторая фаза представлена небольшими телами (дайкообразными) мелкозернистых порфировидных монцолейкогранитов ($\epsilon\gamma T_{1-2b2}$). Комплекс прорывает песчано-глинистые отложения нерасчлененных саламатовской и ярской толщ $D_3-C_{1sm-jar}$. Контакт характеризуется крутым падением и обширной зоной распространения роговиков и ороговикованных пород. Немногочисленные выходы коренных пород на дневную поверхность наблюдаются в долинах рек Шатуниха и Бибиха. Палеозойский комплекс перекрыт довольно мощной толщей четвертичных отложений федосовской свиты (Q_{IVd}) и аллювиальными отложениями третьей ($Q_{III-III3}$), второй (Q_{II2}) и первой (Q_{I1}) надпойменных террас р. Оби [34].

Геохимия природных вод

Природные воды на изучаемой территории характеризуются преимущественно HCO_3 Mg-Ca составом (рис. 1, б) с величиной общей минерализации 158–581 мг/дм³ и содержанием кремния 0,65–30,84 мг/дм³. На рис. 1, в отмечена положительная корреляция между Eh, pH и $O_{2раств.}$ Воды характеризуются слабощелочным pH (7,5–8,5), как восстановительными, так и окислительными условиями геохимической обстановки с Eh от –40,2 до +252,2 мВ и содержаниями $O_{2раств.}$ от 2,99 до 9,91 мг/дм³. Распределение радона закономерно следует общим тенденциям для подземных и поверхностных вод, концентрируясь в первой группе (табл. 1).

Подземные воды (первая группа) собственно пресные (минерализация 364–581 мг/дм³), преимущественно HCO_3 Mg-Na-Ca составом и содержанием $Si=4,34–30,84$ мг/дм³. Геохимические параметры среды отвечают как восстановительной (Eh –40,2 мВ), так и окислительной обстановке (Eh +28,4 мВ) со слабощелочным pH 7,5–7,6 и $O_{2раств.}$ 2,99–5,24 мг/дм³. Геохимические коэффициенты Ca/Si (от 4,14 до 4,78) и Na/Si (от 0,02 до 1,69) свидетельствуют о формировании их состава при взаимодействии с породами преимущественно алюмосиликатного состава. Интересно отметить, что среди первой группы в водах скважины № 2 поселка Седова Заимка выявлен относительно высокий коэффициент Ca/Si , который равен 25,34. Это может свидетельствовать о существенной роли кальция во вмещающих горных породах. Величины остальных геохимических коэффициентов в среднем составляют: Ca/Na 77,17, Ca/Mg 6,63, Mg/Si 1,48, rNa/rCl 2,12, SO_4/Cl 4,02.

В микрокомпонентном составе отмечены высокие относительно поверхностных вод концентрации Fe, Mn, Zn, W, которые составляют в среднем (мг/дм³) 1,18; 0,16; 0,020; 0,0036 соответственно. Повышенные концентрации железа и марганца определяются высоким региональным гидрогеохимическим фоном, а вольфрама – проявлениями рудной минерализации. Для Al (0,0003 мг/дм³), V (0,00003 мг/дм³) и Y (3,50·10⁻⁶ мг/дм³) характерны низкие концентрации. Спектры распределения химических элементов природных вод во многом носят унаследованный характер вмещающих горных пород (рис. 2, а). Значимых коэффициентов концентрации микрокомпонентов не выявлено (рис. 2, б). Сильной миграционной способностью обладает Sr; средней – Si, Mn, Ba, Cs и U; слабой – Ti, Al, P, V, Ni, Rb, Y, Zr, Nb и Th (рис. 2, в). Различия в рядах миграции между общепринятыми значениями по А.И. Перельману связаны в первую очередь с тем, что расчет велся по отношению к роговику, отобранному в исследуемом районе.

Поверхностные воды (вторая группа) по составу отвечают HCO₃ Mg-Ca с минерализацией 158–513 мг/дм³,

содержанием Si=0,65–12,67 мг/дм³. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh +88,8 – +252,2 мВ, pH 7,9–8,5 и содержанием O₂раств. 7,46–9,91 мг/дм³. Значения геохимических коэффициентов выше, чем в подземных водах, в среднем в четыре раза и выстраиваются в следующий ряд: Ca/Na_{204,31}>Ca/Si_{24,56}>Si/Na_{22,89}>Ca/Mg_{8,92}>Na/Si_{5,44}>SO₄/Cl_{4,36}>Mg/Si_{3,68}>гNa/гCl_{2,44}, что указывает на активное накопление кальция в растворе. В микрокомпонентном составе отмечаются высокие относительно подземных вод средние содержания (мг/дм³): В_{0,065}>Al_{0,037}>U_{0,0057}>As_{0,0035}>V_{0,0016}>Cu_{0,0010}>Ni_{0,0009}>Ti_{0,0008}>Pb_{0,00051}>Hg_{0,00002}. Среди поверхностных вод выделяется река Пашенка, для которой характерны максимальные высокие концентрации (мг/дм³) SO₄²⁻₁₀₅>Cl₄₉>Na_{35,93}>K_{3,3}. Химический тип меняется с HCO₃ Mg-Ca на Cl-SO₄-HCO₃ Mg-Na-Ca, что может быть связано с антропогенным влиянием. Значимых коэффициентов концентрации микрокомпонентов не выявлено (рис. 2, б). Сильной миграционной способностью в растворе обладают Sr и U; средней – Mn, P и Ba; поведение остальных химических элементов схоже с первой группой (рис. 2, в).

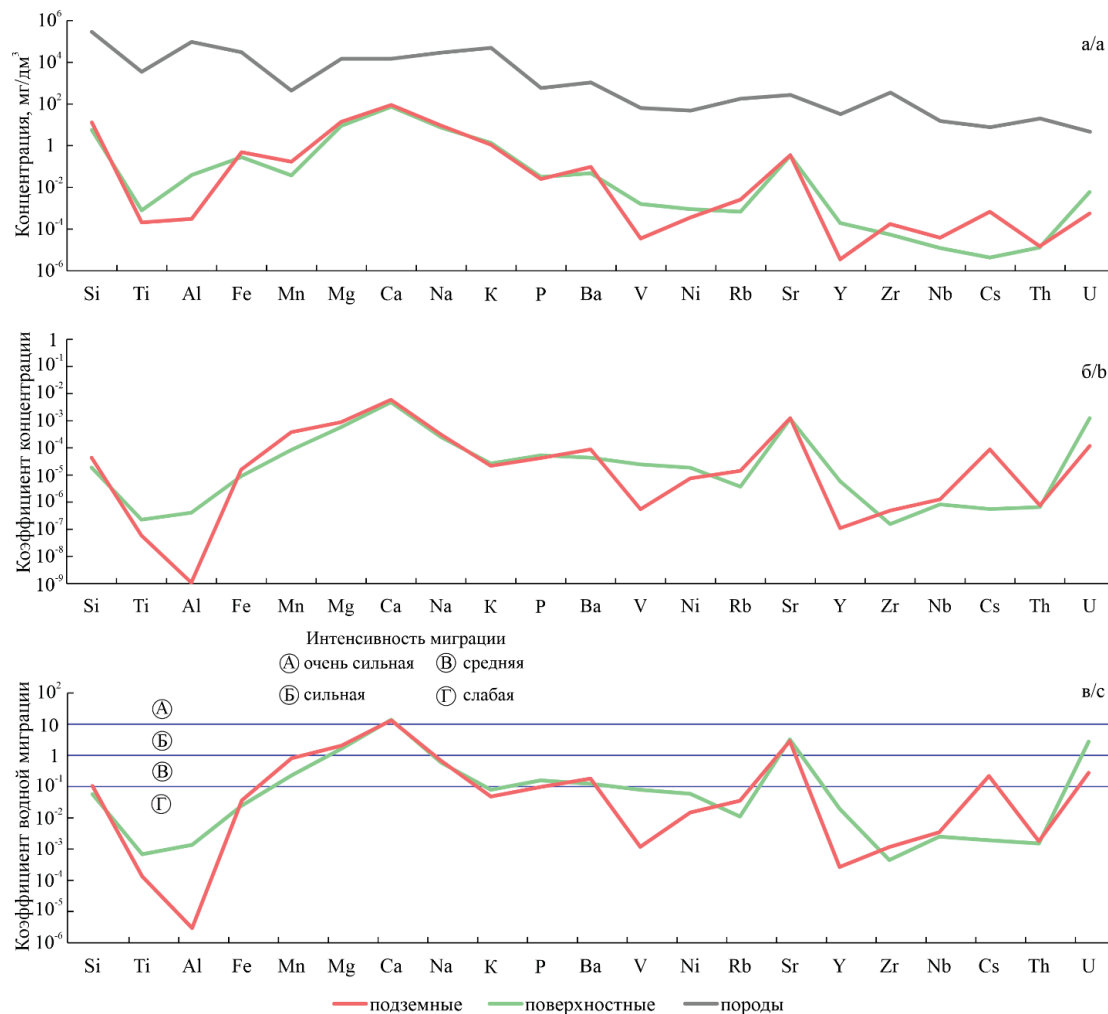


Рис. 2. Спектр распределения микрокомпонентов в водах и вмещающих горных породах проявления радоновых вод Седова Заимка (а), распределение коэффициентов концентраций (б), ряды миграции микрокомпонентов в природных водах (в)

Fig. 2. Spectrum of trace elements distribution of Sedova Zaimka occurrence (а), distribution of concentration factors (б), microelements migration series in natural waters (с)

Таблица 1. Химический состав природных вод проявления Седова Заимка
Table 1. Chemical composition of the natural waters of the Sedova Zaimka occurrence

№ пробы sample no	pH	Eh	O ₂	²²² Rn	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	M [*]	γ	ΣPЭ	Th	U	Th/U
		mB	мг/дм ³	Бк/дм ³	мг/дм ³ /mg/dm ³												
Поверхностные воды/Surface waters																	
121Rn	8,4	+88,8	9,64	1	287	11	2	86	7	6,7	1,1	408	0,000255	0,001230	8,08·10 ⁻⁶	2,07·10 ⁻³	0,0039
122Rn	8,3	+146,5	8,78	1	288	8	4	84	6	5,8	0,9	400	0,000437	0,002063	5,35·10 ⁻⁶	2,45·10 ⁻³	0,0022
123Rn	8,1	+144,4	9,50	–	213	9	2	56	7	7,8	0,9	296	0,000182	0,000665	–	1,48·10 ⁻³	–
124Rn	7,9	+112,9	7,80	–	207	7	2	61	6	0,2	0,9	285	0,000089	0,000264	2,35·10 ⁻⁶	9,23·10 ⁻⁴	0,0025
125Rn	8,6	+93,6	9,73	–	100	16	1	31	5	0,2	1,3	158	0,000372	0,001397	3,57·10 ⁻⁶	7,10·10 ⁻⁴	0,0050
127Rn	8,4	+252,2	9,91	–	211	9	2	63	8	0,1	1,0	298	0,000066	0,000200	–	1,65·10 ⁻³	–
128Rn	8,1	+166,4	8,35	15	204	7	2	62	7	0,1	1,4	289	0,000175	0,000586	–	3,10·10 ⁻⁴	–
129Rn	8,5	+147,1	9,60	–	226	9	2	71	6	0,1	1,1	319	0,000133	0,000532	–	9,40·10 ⁻⁴	–
130Rn	8,4	+144,7	9,64	–	242	8	2	66	7	7,0	1,0	337	0,000094	0,000353	3,98·10 ⁻⁶	1,09·10 ⁻³	0,0037
131Rn	8,1	+184,9	8,01	1	299	5	2	80	10	9,7	1,0	414	0,000071	0,000338	5,35·10 ⁻⁶	4,29·10 ⁻⁴	0,0125
132Rn	8,2	+194,4	7,60	–	358	17	5	94	17	10,9	1,6	513	0,000344	0,001821	1,14·10 ⁻³	1,73·10 ⁻³	0,0066
133Rn	8,3	+160,8	7,46	3	183	105	49	81	15	35,8	3,3	497	0,000058	0,000410	6,34·10 ⁻³	5,48·10 ⁻²	0,0012
Радоновые воды/Radon waters																	
126Rn	7,6	+10,0	2,99	150	259	16	3	72	12	0,3	0,7	364	0,000005	0,000008	6,02·10 ⁻⁶	5,93·10 ⁻⁴	0,0102
138Rn	7,6	–40,2	3,62	201	311	15	6	73	15	18,6	0,9	444	0,000005	0,000011	2,37·10 ⁻³	6,39·10 ⁻⁴	0,0371
139Rn	7,5	+28,4	5,24	13	349	34	9	110	12	7,3	1,6	532	0,000001	0,000019	–	3,91·10 ⁻⁴	–
6215	–	–	–	428	292	–	15	62	12	26,0	–	407	–	–	–	–	–
Подземные воды/Groundwaters																	
7584	–	–	–	–	281	12	4	72	12	8,0	–	389	–	–	–	–	–
6343	–	–	–	–	342	55	15	81	10	53,0	–	556	–	–	–	–	–
6859	–	–	–	–	427	–	12	80	17	45,0	–	581	–	–	–	–	–
6481	–	–	–	–	317	6	12	64	9	40,0	–	448	–	–	–	–	–
6333	–	–	–	–	366	16	12	88	14	26,0	–	522	–	–	–	–	–

Примечание: № пробы соответствует рис. 1, а; * – минерализация; «–» – нет данных.

Note: Sample number corresponds to Fig. 1, a; * – mineralization; «–» – no data.

Радионуклидный и редкоземельный состав природных вод

Результаты радиохимических исследований природных вод представляют большой интерес, так как природные радионуклиды из-за большого ионного радиуса являются весьма несовместимыми элементами и концентрируются в остаточном расплаве, в итоге большое их количество содержится в породах преимущественно кислого состава. Активность ²²²Rn в подземных водах варьирует в диапазоне от 13 до 428 Бк/дм³, что позволяет отнести их к классам от безрадоновых до умеренно радоновых (по классификации Н.И. Толстихина) [7].

Воды обогащены (мг/дм³): ²³⁸U (3,91·10⁻⁴–6,39·10⁻⁴), ²³²Th (6,02·10⁻⁶–2,37·10⁻⁵). ²³²Th/²³⁸U изменяется от 0,01 до 0,04, при среднем 0,02. Поверхностные воды отличаются более высокими концентрациями ²³⁸U (3,10·10⁻⁴–5,48·10⁻²) мг/дм³ и низкими ²³²Th (2,35·10⁻⁶–6,34·10⁻⁵) мг/дм³. ²³²Th/²³⁸U отношение в поверхностных водах варьирует в интервале от 0,0011 до 0,0125, при среднем 0,0047. Интересно отметить отрицательную корреляцию между Th/U отношением и геохимическими параметрами среды (рис. 3, а, б). Это вполне закономерная картина, так как по химическим свойствам уран хорошо мигрирует в окислительных, а торий в восстановительных условиях. Суммарная β-активность радоновых вод составляет 32 мБк/дм³. Уранизотопное отношение (γ) ²³⁴U/²³⁸U составляет 5,75 при активности изотопов урана (мБк/дм³): ²³⁴U (115±7), ²³⁸U (20±2), что указывает на неглубокую циркуляцию изученных вод. Активность изотопов радия в водах равна у ²²⁶Ra 70±7, а у ²²⁸Ra 51,8±3,9 мБк/дм³. Отношение ²²⁶Ra/²²⁸Ra в HCO₃Mg-Na-Ca радоновых водах составляет 1,35.

На присутствие в водах редкоземельных элементов (РЗЭ) указывает наличие в них иттрия, так как последний является химическим аналогом лантана. Это можно заметить на рис. 3, д, где показана положительная корреляция между иттрием и РЗЭ. Одной из главных причин изучения РЗЭ в водах является использование их в качестве чувствительных маркеров процессов взаимодействия в системе вода–порода. Так, воды сильно различаются по редкоземельному составу. Сумма РЗЭ в подземных водах составляет 8,23·10⁻⁶–1,86·10⁻⁵ мг/дм³, в поверхностных – 2,00·10⁻⁴–1,82·10⁻³ мг/дм³, что в среднем выше в 50 раз. В подземных водах сумма тяжелых РЗЭ ниже, чем легких, в среднем в семь раз, что указывает на присутствие во вмещающих породах минералов, концентрирующих легкие РЗЭ (полевые шпаты, биотит). Обратная же картина наблюдается у поверхностных вод, где тяжелых РЗЭ больше легких практически в семь раз, это может быть обусловлено высокими значениями pH. Наблюдается положительная корреляция суммы РЗЭ с геохимическими параметрами среды, такими как Eh и pH. Такая зависимость может указывать на существенную роль в питании речных вод подземными.

Изотопия O, H и C_{org} природных вод

Данные о составе стабильных изотопов H, O и C_{org} в водах п. Седова Заимка представлены в табл. 2 и на рис. 4. Все изученные воды имеют слабощелочную среду (значения pH варьируют от 7,6 до 8,5), величина общей минерализации изменяется в довольно широком диапазоне: от 158 мг/дм³ в водах р. Обь до 513 мг/дм³ в водах р. Большой Барлак. Остальные

изученные объекты имеют промежуточные значения величины общей минерализации, изменяющейся от 300 до 400 мг/дм³. Главными анионами в составе изученных вод выступают гидрокарбонат- и сульфат-ионы, остальные (Cl⁻, PO₄³⁺ и др.) – в подчиненном количестве (рис. 1, б). Мольные соотношения SO₄²⁻/HCO₃⁻ в изученных водах не превышают 9×10⁻². Суммарное содержание (Dissolved Inorganic Carbon – DIC) в водах, определенное как сумма мольных концен-

траций CO₂, HCO₃⁻ и CO₃²⁻, согласуется с величиной общей минерализации: максимальное значение характерно для вод р. Большой Барлак (7,3 ммоль/дм³), минимальное – для вод р. Обь (2,2 ммоль/дм³), при среднем содержании в 4–6 ммоль/дм³. Изотопный состав кислорода и водорода вод находится в довольно узком интервале значений: от –126,3 до –111,0 ‰ для δD и от –16,6 до –14,1 ‰ для δ¹⁸O. Водорастворенная углекислота (DIC) имеет значения δ¹³C_{DIC} от –13,6 до –5,2 ‰.

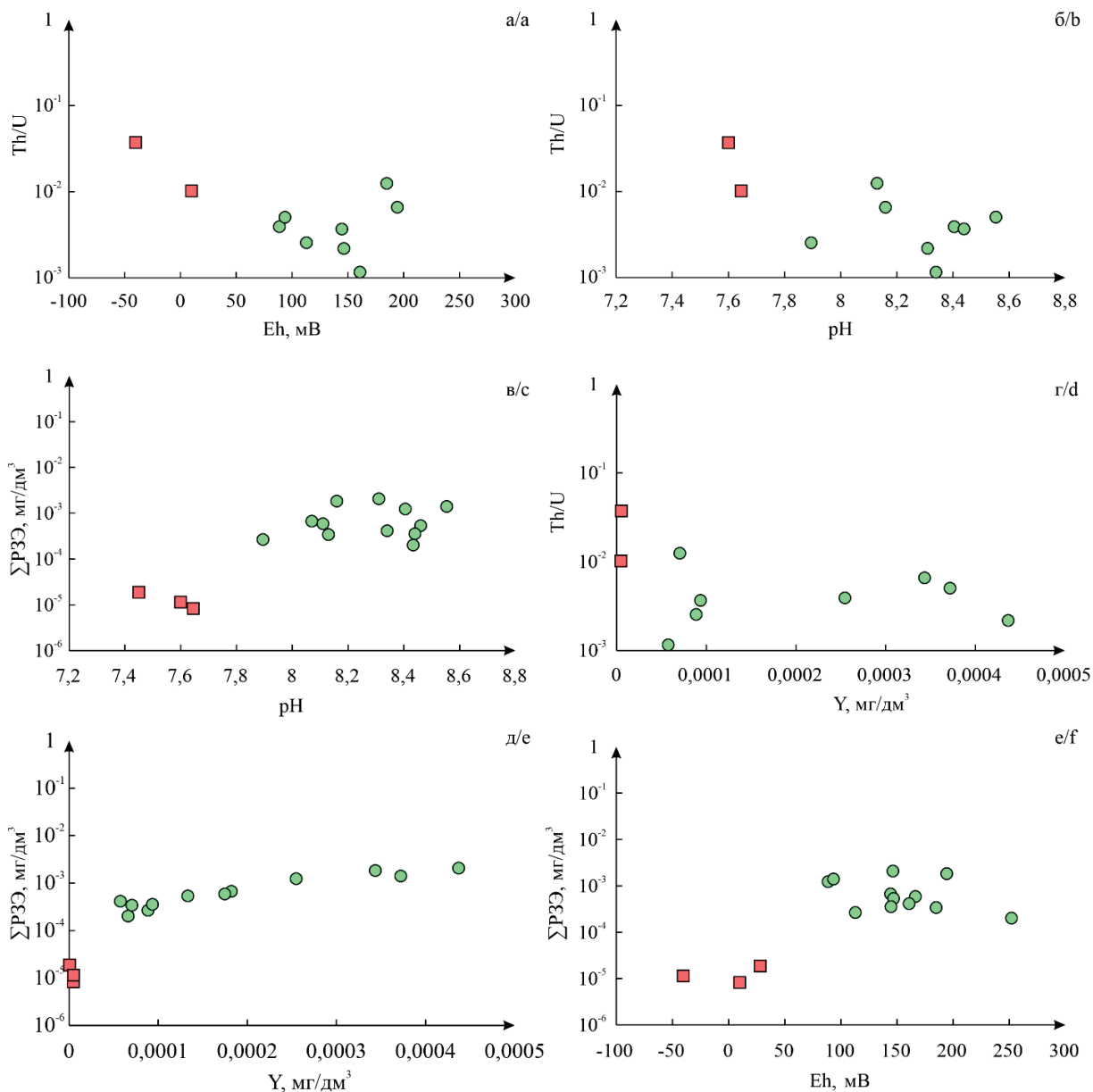


Рис. 3. Зависимость Th/U отношения, Y и ΣPЗЭ от геохимических параметров среды природных вод. Условные обозначения – на рис. 1, б

Fig. 3. Dependence of the Th/U ratio, Y and ΣREE on the geochemical parameters of the environment of natural waters. For designations, see Fig. 1

На рис. 4, а представлены значения δD и δ¹⁸O для поверхностных и подземных (радоновых) вод п. Седова Заимка, также приведены тренды глобальной линии метеорных вод (GMWL) [35] и локальных линий метеорных вод, основанных на данных международной базы Wiser (LMWL Wiser) [36] и собственных

исследованиях (LMWL 2020) [24]. Большинство полученных проб хорошо ложатся на перечисленные линии метеорных вод. Отметим, что наиболее корректно изученные воды описывает локальная линия LMWL 2020, полученная авторами [24]. Результаты изотопно-геохимических исследований указывают на

метеорно-инфильтрационное происхождение радоновых вод. Ряд точек отклоняется от линий метеорных вод вправо. Для поверхностных вод это отклонение обусловлено их испарением [37], которое может быть описано локальной линией испарения $\delta D=4,8 \times \delta^{18}O-41,3$, достаточно близкой к указанной в работе [24]: $\delta D=5,2 \times \delta^{18}O-37,7$. В наибольшей степени эффект испарения проявляется для вод небольшой реки Пашенка (обр. 133Rn), для более крупных водоемов он несущественен.

Таблица 2. Изотопный состав H, O и DIC в водах п. Седова Заимка

Table 2. Isotopic composition of H, O, and DIC in the waters of Sedova Zaimka

№ пробы sample no	$\delta^{13}C_{VPDB}$	δD_{VSMOW}	$\delta^{18}O_{VSMOW}$	sum DIC, ммоль/дм ³ mmol/dm ³	SO ₄ ²⁻ HCO ₃ ⁻
	‰				
121Rn	-10,2	-117,8	-16,1	5,94	0,020
122Rn	-12,0	-117,3	-15,7	5,90	0,014
123Rn	-13,1	-117,1	-15,9	4,43	0,022
124Rn	-13,6	-113,6	-15,4	4,36	0,017
125Rn	-8,3	-123,3	-16,6	2,20	0,087
127Rn	-13,6	-119,2	-16,2	4,41	0,023
128Rn	-13,3	-116,2	-15,7	4,30	0,019
129Rn	-12,9	-119,8	-16,3	4,71	0,021
130Rn	-12,7	-118,9	-16,4	5,02	0,018
131Rn	-10,4	-116,8	-16,0	6,15	0,010
132Rn	-9,0	-121,0	-16,6	7,34	0,024
133Rn	-5,2	-111,0	-14,1	3,86	0,305
126Rn	-9,9	-126,3	-16,3	5,42	0,033
138Rn	-9,7	-121,1	-16,6	6,36	0,026
139Rn	-6,9	-122,4	-16,8	7,22	0,052

Отдельно выделяются точки, характеризующие изотопный состав вод, отобранных из скважины глубиной 110 м в п. Седова Заимка (обр. 126Rn: $\delta D=-126,3$ ‰; $\delta^{18}O=-16,3$ ‰) и р. Обь (обр. 125Rn: $\delta D=-123,3$ ‰; $\delta^{18}O=-16,6$ ‰). Эти воды имеют наиболее легкий изотопный состав кислорода и водорода, что может свидетельствовать о смещении акцента питания подземных вод скважины к осадкам холодного периода года [24, 37]. Второе заключение, вытекающее из полученных данных, – это активное участие подземных вод в питании р. Оби на данном участке, что можно увидеть из прямой смешения, представленной на рисунке стрелкой, соединяющей изотопный состав вод обр. 126Rn, р. Обь в п. Седова Заимка и р. Обь в Заельцовском районе г. Новосибирска (согласно данным работы [23], $\delta D=-121,4$ ‰ и $\delta^{18}O=-16,4$ ‰).

Для пробы 126Rn наблюдается существенный кислородный сдвиг (+0,7 ‰ относительно GMWL, или +0,9 ‰ относительно LMWL 2020). Наиболее вероятным объяснением этого факта представляется изотопный обмен кислородом вод с окружающими изотопно-тяжелыми породами питающего водоносного горизонта [23, 38]. Отметим, что для других подземных вод (образцы 138 и 139 Rn) такого эффекта не наблюдается, что, по-видимому, обусловлено отсутствием пород, способных к изотопному обмену кислородом, в контакте с водами этих скважин. При этом насыщенность вод радоном для глубоких скважин закономерно увеличивается: 150 и 201 Бк/дм³ для обр. 126 и 138 против 14 Бк/дм³ для обр. 139.

Интересно также сравнить изученные в настоящей работе радоновые воды с другими проявлениями, ранее исследованными авторами: Инские источники [23] и Новобибеевское [24]. Большинство исследованных в настоящей работе вод поверхностные. Их изотопный состав довольно близок к таковому для поверхностных вод вблизи Инских источников ($\delta D \sim -120$ ‰; $\delta^{18}O \sim -16$ ‰) и водам р. Ояш ($\delta D = -119$ ‰; $\delta^{18}O = -15,2$ ‰). При этом перемещение с севера Новосибирской области на юг приводит к постепенному обеднению вод тяжелыми изотопами, что также было продемонстрировано в работе [39]. Радоновые воды Инских источников ($\delta D \sim -127$ ‰; $\delta^{18}O \sim -17$ ‰), Новобибеевского проявления ($\delta D \sim -127$ ‰; $\delta^{18}O \sim -17$ ‰) и Седовой Заимки ($\delta D = -126,3$ ‰; $\delta^{18}O = -16,3$ ‰) имеют почти идентичный изотопный состав, несмотря на достаточно большую территориальную отдаленность этих объектов. На текущий момент довольно сложно однозначно указать причину такого сходства, но, вероятно, оно указывает на очень близкие условия формирования растворителя таких вод (то есть самой воды), поскольку сомнительно предполагать для них питание из одного водоносного горизонта.

Исследованные воды имеют неширокое распределение изотопного состава DIC (от -13,6 до -5,2 ‰). Такие значения характерны для смешанного карбонат-силикатного выветривания пород с участием биогенной водорастворенной углекислоты [24, 39]. Этот тезис также подтверждает и содержание DIC – от 2,2 до 7,3 ммоль/л, что существенно превышает естественную концентрацию углекислоты в водах (0,01–0,08 ммоль/дм³) [39–41] при исключительном питании атмосферной углекислотой. С увеличением содержания DIC в водах значения $\delta^{13}C$ становятся в целом все более насыщенными изотопом ¹³C (исключения составляют реки Пашенка и Обь) (рис. 4, б). Это может являться следствием постепенного насыщения вод тяжелой диффузионной углекислотой, наследующей изотопный состав атмосферного CO₂ [23, 40], либо протеканием процессов выветривания изотопно-тяжелых карбонатных пород с увеличением содержания углекислоты в водах. Так, авторы работы [23] указывают, что изотопный состав карбонатного материала в водовмещающих породах Инских источников $\delta^{13}C \sim -2,9$ ‰.

Интересно отметить различие в содержании DIC в исследованных водах. Важную роль, по-видимому, играют такие факторы, как протяженность водного пути, количество притоков и площадь водосбора. В частности, из полученных данных видно, что для мелких рек Шатуниха, Ключевая, Пашенка, Безымянная и Смородинка (рис. 4, б), имеющих минимальные из представленных рек площади водосбора и протяженности, содержание DIC составляет от 4 до 5 ммоль/дм³. Для большей р. Биыха концентрация DIC уже приближается к 6 ммоль/дм³, а для наибольшей из притоков Оби реки Барлак (включающей Малый и Большой Барлак) содержание углекислоты максимальное и составляет 6–7 ммоль/дм³. При этом следует отметить, что наименьшая концентрация DIC характерна для вод р. Обь, что, по-видимому,

обусловлено большим объемом ее водного потока в сравнении с притоками, и вероятным участием в ее питании подземных вод с низким содержанием уг-

лекислоты. Изучение этого вопроса требует дальнейших исследований и на текущий момент носит характер заметки.

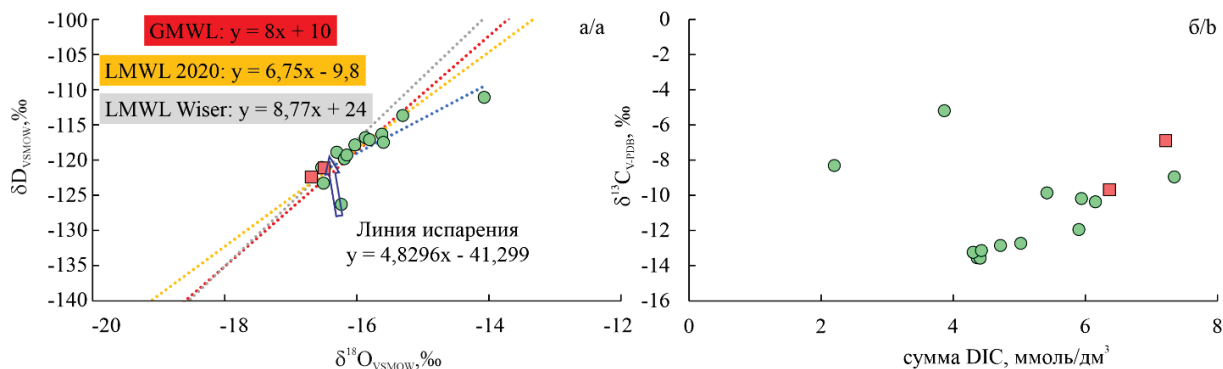


Рис. 4. Изотопный состав кислорода и водорода изученных вод относительно GMWL [35] и локальных линий метеорных вод [36] (а) зависимость изотопного состава углерода от концентрации DIC в водах проявления Седова Заимка (б). Условные обозначения – на рис. 1, б

Рис. 4. Isotope composition of oxygen and hydrogen in the studied waters with respect to GMWL [35] and local lines of meteoric waters [36] (a); the isotope composition of carbon depending on the concentration of DIC in waters (b). For designations, see Fig. 1

Выводы

1. Открыто проявление радоновых вод Седова Заимка. Подземные воды отличаются HCO_3^- Mg-Na-Ca состав с минерализации 364–581 мг/дм³ и концентрацией Si 4,34–30,84 мг/дм³. Характеризуются как восстановительной (Eh –40,2 мВ), так и окислительной обстановкой (Eh +28,4 мВ), pH 7,5–7,6 и $\text{O}_{2\text{раств.}}$ 2,99–5,24 мг/дм³. Главной ролью в формировании радоновых вод на изучаемой территории является взаимодействие в системе вода–порода, что подтверждается геохимическими коэффициентами $(\text{Ca}/\text{Na}_{77,17} > \text{Si}/\text{Na}_{15,34} > \text{Ca}/\text{Si}_{11,42} > \text{Ca}/\text{Mg}_{6,63} > \text{SO}_4/\text{Cl}_{4,02} > \text{rNa}/\text{rCl}_{2,12} > \text{Mg}/\text{Si}_{1,48} > \text{Na}/\text{Si}_{0,92})$ и высокими содержаниями в подземных водах Fe, Mn, Zn, W. А также повышенной миграционной способностью в растворе Sr, Si, Mn, Ba, Cs и U.
2. Изученные воды относятся к классам безрадоновых и умеренно радоновых (^{222}Rn 13–428 Бк/дм³). Воды обогащены (мг/дм³): ^{238}U от $3,91 \cdot 10^{-4}$ до $6,39 \cdot 10^{-4}$, ^{232}Th от $6,02 \cdot 10^{-6}$ до $2,37 \cdot 10^{-5}$. Уранизотопное отношение (γ) $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ составляет 5,75 при активности изотопов урана (мБк/дм³): ^{234}U (115±7), ^{238}U (20±2), что указывает на неглубокую циркуляцию изученных вод. Сумма тяжелых редкоземельных элементов в подземных водах составляет $3,75 \cdot 10^{-7}$ – $3,27 \cdot 10^{-6}$ мг/дм³, а легких $4,96 \cdot 10^{-6}$ – $1,82 \cdot 10^{-5}$, что указывает на присутствие в системе вода–порода минералов-концентраторов ЛРЗЭ. Выявлена положительная корреляция сум-

- мы РЗЭ от Eh и pH, что может указывать на существенную роль в питании речных вод подземными.
3. Изотопный состав радоновых вод (от –126,3 до –121,1 ‰ для δD и от –16,8 до –16,3 ‰ для δ¹⁸O) указывает на их метеорно-инфильтрационное происхождение. Сравнительный анализ изотопного состава радоновых вод с проявлениями Инские источники и Новобибеевское указывает на близкие условия их формирования.
4. Исследованные воды имеют неширокое распределение изотопного состава DIC (от –13,6 до –8,3 ‰). Такие значения характерны для смешанного карбонат-силикатного выветривания пород с участием биогенной водорастворенной углекислоты. С увеличением содержания DIC в водах значения δ¹³C становятся в целом все более насыщенными изотопом ¹³C, что обусловлено более интенсивным выветриванием карбонатного материала водами, а также большей составляющей диффузионной почвенной углекислоты в составе DIC. Содержание DIC (от 2,2 до 7,3 ммоль/дм³) в изученных водах определяется протяженностью рек, площадями их водосбора.

Полевые и аналитические работы по изучению химического состава природных вод выполнены при финансовой поддержке проектов Министерства науки и высшего образования РФ №№ FWZZ-2022-0014, FSWW-0022-2020, аналитические работы по исследованию геохимических особенностей водовмещающих горных пород и изотопного состава водорода, кислорода вод и DIC – при поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгушин А.П., Царук И.И. Урановорудный потенциал Центрально-Сибирского региона // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 10. – С. 28–34.
2. Царук И.И., Дундуков Н.Н. Основные вехи создания минерально-сырьевой базы урана России и Ближнего Зарубежья // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 10. – С. 3–17.
3. Уран российских недр / Г.А. Машковцев, А.К. Константинов, А.К. Мигута, М.В. Шумилин, В.Н. Щеточкин. – М.: ВИМС, 2010. – 850 с.
4. Геологическое строение и полезные ископаемые Западной Сибири. Т. II. Полезные ископаемые / Ю.Н. Вараксин, В.Г. Свиридов, Н.А. Росляков, А.Т. Афанасьев, Г.А. Вавилихин, И.П. Васильев, В.И. Виниченко, А.Н. Леонов, А.И. Марус, Л.С. Михантьева, Г.В. Нестеренко, Г.Л. Самсонов,

- З.Я. Сердюк. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 1998. – 254 с.
5. Вериго Е.К., Быкова В.В., Гусев В.К. Заельцовское месторождение радоновых вод (Новосибирское Приобье) // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири. – 1979. – Т. 14. – С. 47–51.
 6. Гусев В.К., Вериго Е.К. Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана. Изменение природных условий под влиянием деятельности человека. – Новосибирск: Изд-во «Наука», Сибирское отделение, 1984. – С. 99–107.
 7. Посохов Е.В., Толстихин Н.И. Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические). – М.: Изд-во «Недра», 1977. – 240 с.
 8. Росляков Н.А., Жмодик С.М., Пахомов В.Г. Естественные радионуклиды в геологической среде Новосибирской области // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV Международной конференции. – Томск, 4–8 июня 2013. – Томск: Томский политехнический университет, 2013. – С. 461–464.
 9. Groundwater chemistry and radon-222 distribution in Jerba Island, Tunisia / F. Telahigue, B. Agoubi, F. Souid, A. Kharroubi // Journal of Environmental Radioactivity. – 2018. – V. 182. – P. 74–84.
 10. Sherif M.I., Sturchioa N.C. Radionuclide geochemistry of groundwater in the Eastern Desert, Egypt // Applied Geochemistry. – 2018. – V. 93. – P. 69–80.
 11. Radon in the groundwater in the Amman-Zarqa Basin and related environments in Jordan / P. Bhattacharya, M.M. Abu-Khadra, A.T. Shawaqfeh, Z. Naddaf, J.P. Maity // Groundwater for Sustainable Development. – 2018. – V. 7. – P. 73–81.
 12. Amiri V., Nakhai M., Lak R. Using radon-222 and radium-226 isotopes to deduce the functioning of a coastal aquifer adjacent to a hypersaline lake in NW Iran // Journal of Asian Earth Sciences. – 2017. – V. 147. – P. 128–147.
 13. Radiological studies in the hot spring region of Mahallat, central Iran / M. Beitollahi, M. Ghiassi-Nejad, A. Esmaeli, R. Dunker // Radiation Protection Dosimetry. – 2007. – V. 123 (4). – P. 505–508.
 14. Correlations between radium and radon occurrence and hydrogeochemical features for various geothermal aquifers in northwestern Romania / C.A. Roba, D. Nita, C. Cosma, V. Codrea, S. Olah // Geothermics. – 2012. – V. 42. – P. 32–46.
 15. Contribution of 222Rn bearing water to indoor radon and indoor air quality assessment in hot spring hotels of Guangdong, China / G. Song, X. Wang, D. Chen, Y. Chen // Journal of Environmental Radioactivity. – 2011. – V. 102 (4). – P. 400–406.
 16. Annual effective dose assessment of radon in drinking water from abandoned tin and Cassiterite mining site in Oyun, Kwara State, Nigeria / M.M. Orosun, B.T. Ajibola, E.O. Ehinlafa, K.A. Issah, N.B. Salawu, D.S. Ishaya, K.K. Ochommadu, D.A. Adewuyi // Pollution. – 2022. – V. 8. – Iss. 1. – P. 181–192.
 17. Rahimi M., Asadi M.A.A., Jabari K.L. Radon concentration in groundwater, its relation with geological structure and some physicochemical parameters of Zarand in Iran // Applied Radiation and Isotopes. – 2022. – V. 185. – P. 110223.
 18. Murgulet D., Lopez C.V., Douglas A.R. Radioactive and stable isotopes reveal variations in nearshore submarine groundwater discharge composition and magnitude across low inflow northwestern Gulf of Mexico estuaries // Science of the Total Environment. – 2022. – V. 8231. – № 153814.
 19. Küçükönder E., Gümür S. Radon gas measurement in water samples in Kahramanmaraş province of Turkey // Water, Air, and Soil Pollution. – 2022. – V. 233. – Iss. 6. – № 175.
 20. Haroon H., Muhammad S. Spatial distribution of radon concentrations in groundwater and annual exposure doses in Mirpur District Pakistan // Groundwater for Sustainable Development. – 2022. – V. 17. – № 100734.
 21. 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.
 22. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky-Mochishche zone of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, R. Kamenova-Totzeva, T.V. Korneeva // Environmental Earth Sciences. – 2021. – V. 80. – № 216.
 23. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Иньские источники» (юг Западной Сибири) / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, Л.Г. Вакуленко, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 135–145.
 24. Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Новобибеевского проявления радоновых вод / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, А.Н. Фәге, А.А. Хвашевская, А.С. Деркачев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 57–72.
 25. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) / Д.А. Новиков, А.Ф. Сухорукова, Т.В. Корнеева, Р.М. Каменова-Тоцева, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 192–208.
 26. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachyov // Groundwater for Sustainable Development. – 2021. – V. 15. – P. 1–8.
 27. Epstein S., Mayeda T. Variation of O 18 content of waters from natural sources // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1953. – V. 4 (5). – P. 213–224.
 28. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods // Rapid Communications in Mass Spectrometry. – 2000. – V. 4. – P. 1044–1046.
 29. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO₂ / M. Görka, P.E. Sauer, D. Lewicka-Szczepak, M.-O. Jedrysek // Environmental Pollution. – 2011. – V. 159. – P. 294–301.
 30. Correction algorithm for online continuous flow δ13C and δ18O carbonate and cellulose stable isotope analyses / M.N. Evans, K.J. Selmer, B.T. Breeden III, A.S. Lopatka, R.E. Plummer // Geochim. Geophys. Geosyst. – 2016. – V.17. – P. 3580–3588.
 31. International Atomic Energy Agency. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx> (дата обращения: 15.05.2022).
 32. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1975. – 342 с.
 33. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-44 – Новосибирск. Объяснительная записка / Г.А. Бабин, А.И. Черных, А.Г. Головина, С.В. Жигалов, С.С. Долгушин, Е.В. Ветров, Т.В. Кораблева, Н.А. Бодина, Н.А. Светлова, Г.С. Федосеев, А.П. Хилько, В.А. Епифанов, Ю.И. Лоскутов, И.Ю. Лоскутов, М.В. Михаревич, Е.А. Пихутин. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 392 с.
 34. Геологическая карта СССР. Первое поколение. Кулундинско-Барабинская серия, масштаб: 1:200000 / под ред. С.Б. Шацкого. – Новосибирск: Новосибирское территориальное геологическое управление, 1970.
 35. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
 36. IAEA Nucleus for Nuclear Knowledge and Information. URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx> (дата обращения: 15.05.2022).
 37. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы земли. – М.: Изд-во «Научный мир», 2009. – 632 с.
 38. Aydin H., Karakuş H., Mutlu H. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2020. – V. 390. – Article no. 106708.
 39. Изотопный состав (H, O и C) природных вод Новосибирской городской агломерации / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, А.Ф. Сухорукова, А.С. Деркачев, А.А. Максимова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология: Материалы XVII международной научной конференции. – Новосибирск, 19–21 мая 2021. – Новосибирск: ИНГТ СО РАН, 2021. – Т. 2. – № 1. – С. 149–159.

40. 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.
41. Первые изотопно-гидрогеохимические данные по природным водам юго-восточного склона кряжа Чекановского / Д.А. Новиков, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, П.А. Ян // Известия

Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 157–167.

Поступила 10.06.2022 г.
Прошла рецензирование 06.07.2022 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.

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., инженер лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; ассистент кафедры минералогии и геохимии Новосибирского национального исследовательского 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.

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

Деркачев А.С., студент, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.

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

Хващевская А.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 551.464.3 (1-924.71)

DISCOVERY OF LOW-RADON WATERS – SEDOVA ZAIMKA

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

Aleksandr N. Pyrayev^{3,2},
pyrayev@igm.nsc.ru

Anastasia A. Maksimova^{2,1},
rock.nastaya64@gmail.com

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

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

Anton S. Derkachev²,
a.derkachev@g.nsu.ru

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

Albina A. Khvachshevskaya⁴,
unpc_voda@mail.ru

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

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

³ Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the investigation is in obtaining actual isotope-geochemical data on natural waters and water-bearing rocks in the Sedova Zaimka, an occurrence of radon waters.

Objective: to study the features of chemical composition of natural waters and water-bearing rocks, and to obtain the first data on the activity of ²²²Rn and on the isotope composition: δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$, ²³⁴U, ²³⁸U, ²²⁶Ra and ²²⁸Ra.

Methods. Laboratory studies of the chemical composition by means of titration, ion chromatography, mass spectrometry with inductively coupled plasma were carried out at the Research Laboratory of Hydrogeochemistry at the School of Earth Sciences and Engineering of the Tomsk Polytechnic University. Determination of the set of parameters δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C_{DIC}$ in waters and dissolved inorganic carbon was carried out at the Shared Equipment Center of the IGM SB RAS with the help of Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253, equipped with sample preparation attachments H/Device (to determine δD) and GasBench II (to determine $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C_{DIC}$). ²²²Rn concentration in waters was determined using the Alfarad Plyus instrument in the Laboratory of Hydrogeology of Sedimentary Basins of Siberia at the IPGG SB RAS. The data on the total β -activity of waters, as well as on the activities of ²³⁴U, ²³⁸U, ²²⁶Ra and ²²⁸Ra, were obtained after preliminary radiochemical sample preparation using an alpha spectrometer ALPHA-ENSEMBLE-8 (Ametek, ORTEC, USA); gamma-spectrometric system arranged on the basis of well coaxial HPGe semiconductor detector with low-background cryostat EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA (EURISYS MEASURES, France) and alpha-beta radiometer UMF-2000 with a silicon detector (Doza, Russia) to measure low activities. Data separation into homogeneous geochemical sets was performed with the help of Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si coefficients. To determine the extent of element concentrating in natural waters, the coefficients of concentration $K_k = \frac{m_x}{n_x}$ and water migration (according to A. I. Perelman) $Kx_1 = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$ were calculated.

Results. Radon water occurrence at Sedova Zaimka was discovered, and isotope-geochemical investigation was carried out. Radon waters (with ²²²Rn activity up to 428 Bq/dm³) are mainly characterized by HCO₃ Mg-Na-Ca composition with TDS 158 to 581 mg/dm³ and silicon content 4,34 to 30,84 mg/dm³. The geochemical parameters of the environment vary from reductive to oxidative settings with Eh from -40,2 to +28,4 mV; pH from 7,5 to 7,6 and O_{2dissolved} from 2,99 to 5,24 mg/dm³. Geochemical coefficients are equal to: Ca/Na 77,17; Ca/Mg 6,63; Ca/Si 11,42; Mg/Si 1,48; Na/Si 0,92; Si/Na 15,34; rNa/rCl 2,12; SO₄/Cl 4,02, which is a regular indication of the formation of radon water composition in the embedding rocks of mainly aluminosilicate composition. Among trace components, the highest average content is characteristic of (mg/dm³): Si=17,77; Fe=1,18; Mn=0,16; Zn=0,020 and W=0,0036. No significant coefficients of component concentrations were revealed. Strong migration ability in solution is exhibited by Sr, medium – by Si, Mn, Ba, Cs and U. The total β -activity of the waters is 32 mBq/dm³. The concentrations of natural radionuclides vary (mg/dm³): ²³⁸U from 3,91·10⁻⁴ to 6,39·10⁻⁴; ²³²Th from 6,02·10⁻⁶ to 2,37·10⁻⁵ and ²²⁶Ra from 6,66·10⁻¹¹ to 1,09·10⁻¹⁰. The ²³²Th/²³⁸U ratio in the waters varies from 1,02·10⁻² to 3,71·10⁻², which is a consequence of the oxidative geochemical setting, in which thorium does not migrate. The uranium isotope ratio (γ) ²³⁴U/²³⁸U is 5,75, with the activity of uranium isotopes (mBq/dm³): ²³⁴U (115±7), ²³⁸U (20±2), which points to not very deep circulation of the studied waters. The activity of radium isotopes in the waters is 70±7 mBq/dm³ for ²²⁶Ra and 51,8±3,9 mBq/dm³ for ²²⁸Ra. The ²²⁶Ra/²²⁸Ra ratio in HCO₃ Mg-Na-Ca radon waters is equal to 1,35. The isotope composition of radon waters (from -126,3 to -121,1 ‰ for δD and from -16,8 to -16,3 ‰ for $\delta^{18}O$) points to their meteoric infiltration origin. The isotope composition of carbon $\delta^{13}C_{DIC}$ points to the biogenic origin of carbon dioxide and its participation in carbonate-silicate weathering of the rocks.

Key words:

Radon waters, stable isotopes, radionuclides, water genesis, granites, new radon water occurrence Sedova Zaimka, West Siberia.

Field and analytical work on the study of the chemical composition of natural waters was carried out with the financial support of projects of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation no. FWZZ-2022-0014, FSWW-0022-2020, analytical work on the study of the geochemical features of water-bearing rocks and the isotopic composition of hydrogen, oxygen of water and DIC – with the support of the project No. 22-17-20029 of the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region.

REFERENCES

- Dolgushin A.P., Tsaruk I.I. Uranium ore potential of the Central Siberian region. *Exploration and protection of mineral resources*, 2015, no. 10, pp. 28–34. In Rus.
- Tsaruk I.I., Dundukov N.N. The main milestones of creating the mineral resource base of uranium in Russia and the Near Abroad. *Exploration and protection of mineral resources*, 2015, no. 10, pp. 3–17. In Rus.
- Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Miguta A.K., Shumilin M.V., Shchetochkin V.N. *Uran rossijskikh nedr* [Uranium of Russian subsurface]. Moscow, VIMS Publ., 2010. 850 p.
- Varaksin Yu.N., Sviridov V.G., Roslyakov N.A., Afanasiev A.T., Vavilikhin G.A., Vasiliev I.P., Vinichenko V.I., Leonov A.N., Marus A.I., Mikhanteyeva L.S., Nesterenko G.V., Samsonov G.L., Serdyuk Z.Ya. *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopyayemye Zapadnoy Sibiri. T. II. Poleznye iskopyayemye* [Geological structure and minerals of Western Siberia. Vol. II. Minerals]. Novosibirsk, SO RAN, NITs OIGGM Publ. House, 1998. 254 p.
- Verigo E.K., Bykova V.V., Gusev V.K. Zaeltsovskoe mestorozhdenie radonovykh vod (Novosibirskoe Priobye) [Zaeltsovsky deposit of radon waters (Novosibirsk Priobye)]. *New data on geology and minerals of Western Siberia*, 1979, Iss. 14, pp. 47–51.
- Gusev V.K., Verigo E.K. Radonovye vody Kolyvan-Tomskoy skladchatoy zony, ikh ispolzovanie i okhrana [Radon waters of the Kolyvan-Tomsk fold zone, their use and protection]. *Izmeneniye prirodnykh uslovy pod vliyaniem deyatel'nosti cheloveka* [Change in natural conditions under the influence of human activity]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. pp. 99–107.
- Posokhov E.V., Tolstikhin N.I. *Mineralnye vody (lechebnye, promyshlennye, energeticheskie)* [Mineral waters (healing, industrial, energy)]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 240 p.
- Roslyakov N.A., Zhmodik S.M., Pakhomov V.G. Prirodnye radionuklidy v geologicheskoy srede Novosibirskoy oblasti [Natural radionuclides in the geological environment of the Novosibirsk region]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede cheloveka. Materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Materials of the IV International Conference]. Tomsk, June 4–8, 2013. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2013. pp. 461–464.
- Telahigue F., Agoubi B., Souid F., Kharroubi A. Groundwater chemistry and radon-222 distribution in Jerba Island, Tunisia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, vol. 182, pp. 74–84.
- Sherif M.I., Sturchio N.C. Radionuclide geochemistry of groundwater in the Eastern Desert, Egypt. *Applied Geochemistry*, 2018, vol. 93, pp. 69–80.
- Abu-Khadra M.M., Shawaqfeh A.T., Naddaf Z., Maity J.P., Bhattacharya P. Radon in the groundwater in the Amman-Zarqa Basin and related environments in Jordan. *Groundwater for Sustainable Development*, 2018, vol. 7, pp. 73–81.
- Amiri V., Nakhaei M., Lak R. Using radon-222 and radium-226 isotopes to deduce the functioning of a coastal aquifer adjacent to a hypersaline lake in NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, vol. 147, pp. 128–147.
- Beitollahi M., Ghiassi-Nejad M., Esmaili A., Dunker R. Radiological studies in the hot spring region of Mahallat, central Iran. *Radiation Protection Dosimetry*, 2007, vol. 123 (4), pp. 505–508.
- Roba C.A., Nita D., Cosma C., Codrea V., Olah S. Correlations between radium and radon occurrence and hydrogeochemical features for various geothermal aquifers in northwestern Romania. *Geothermics*, 2012, vol. 42, pp. 32–46.
- Song G., Wang X., Chen D., Chen Y. Contribution of ²²²Rn bearing water to indoor radon and indoor air quality assessment in hot spring hotels of Guangdong, China. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2011, vol. 102 (4), pp. 400–406.
- Orosun M.M., Ajibola B.T., Ehinlafa E.O., Issah K.A., Salawu N.B., Ishaya D.S., Ochommadu K.K., Adewuyi D.A. Annual effective dose assessment of radon in drinking water from abandoned tin and Cassiterite mining site in Oyun, Kwara State, Nigeria. *Pollution*, 2022, vol. 8, Iss. 1, pp. 181–192.
- Rahimi M., Asadi M.A.A., Jabari K.L. Radon concentration in groundwater, its relation with geological structure and some physicochemical parameters of Zarand in Iran. *Applied Radiation and Isotopes*, 2022, vol. 185, 110223.
- Murgulet D., Lopez C.V., Douglas A.R. Radioactive and stable isotopes reveal variations in nearshore submarine groundwater discharge composition and magnitude across low inflow north-western Gulf of Mexico estuaries. *Science of the Total Environment*, 2022, vol. 8231, no. 153814.
- Küçükkönder E., Gümbür S. Radon gas measurement in water samples in Kahramanmaraş province of Turkey. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2022, vol. 233, Iss. 6, no. 175.
- Haroon H., Muhammad S. Spatial distribution of radon concentrations in groundwater and annual exposure doses in Mirpur District Pakistan. *Groundwater for Sustainable Development*, 2022, vol. 17, no. 100734.
- 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 (4), pp. 1255–1274. In Rus.
- 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.
- Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Vakulenko L.G., Sukhorukova A.F., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Isotope geochemical features of occurrence of low-radon waters «Inskie springs» (south-western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 135–145. In Rus.
- Novikov D.A., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Pyryaev A.N., Fage A.N., Khvashchevskaya A.A., Derkachev A.S., Chernykh A.V. Initial results of the integrated isotope-hydrogeochemical studies of the Novobibevo occurrence of radon-rich waters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 57–72. In Rus.
- Novikov D.A., Sukhorukova A.F., Korneeva T.V., Kamenova-Totzeva R.M., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the «Kamenskoe» field of radon-rich waters (Novosibirsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 192–208. In Rus.
- Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachev A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, vol. 15, pp. 1–8.
- Epstein S., Mayeda T. Variation of O 18 content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, vol. 4 (5), pp. 213–224.
- Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2000, vol. 4, pp. 1044–1046.
- Górka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczepak D., Jedrysek M.-O. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO₂. *Environmental Pollution*, 2011, vol. 159, pp. 294–301.
- Evans M.N., Selmer K.J., Breeden III B.T., Lopatka A.S., Plummer R.E. Correction algorithm for online continuous flow $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ carbonate and cellulose stable isotope analyses. *Geochem. Geophys. Geosyst*, 2016, vol. 17, pp. 3580–3588.
- International Atomic Energy Agency. Available at: <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx> (accessed: 15 May 2022).
- Perelman A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 342 p.

33. Babin G.A., Chernykh A.I., Golovina A.G., Zhigalov S.V., Dolgushin S.S., Vetrov E.V., Korableva T.V., Bodina N.A., Svetlova N.A., Fedoseev G.S., Khilko A.P., Epifanov V.A., Loskutov Yu.I., Loskutov I.Yu., Mikharevich M.V., Pikhutin E.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tretye pokolenie). Seriya Altaye-Sayanskaya. List N-44 – Novosibirsk. Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet N-44 - Novosibirsk. Explanatory letter]. St. Petersburg, Cartographic factory VSEGEI, 2015. 392 p.
34. *Geologicheskaya karta SSSR. Pervoe pokolenie. Kulundinsko-Barabinskaya seriya, masshtab 1:200000* [Geological map of the USSR. First generation. Kulunda-Barabinsk series, scale: 1:200000]. Ed. by S.B. Shatsky. Novosibirsk, Novosibirsk Territorial Geological Administration Publ., 1970.
35. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
36. *IAEA Nucleus for Nuclear Knowledge and Information*. Available at: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx> (accessed: 15 May 2022).
37. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery* [Isotopy of the hydrosphere]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 632 p.
38. Aydin H., Karakuş H., Mutlu H. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, vol. 390, article no. 106708.
39. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Sukhorukova A.F., Derkachev A.S., Maksimova A.A. Izotopny sostav (N, O i S) prirodnykh vod Novosibirskoy gorodskoy aglomeratsii [Isotopic composition (H, O and C) of natural waters of the Novosibirsk city agglomeration]. *Interexpo GEO-Sibir – Nedropolzovanie. Gornoe delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh. Ekonomika. Geoekologiya. Materialy XVII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Interexpo GEO-Siberia – Subsoil use. Mining. Directions and technologies for prospecting, exploration and development of mineral deposits. Economics. Geoecology. Proc. of the XVII International Scientific Conference]. Novosibirsk, May 19–21, 2021. Novosibirsk, IPGG SB RAS, 2021. Vol. 2, no. 1, pp. 149–159.
40. 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.
41. Novikov D.A., Maksimova A.A., Pyryaev A.N., Yan P.A. First isotope-hydrogeochemical data on the natural waters of the southeast slope of the Chekanovsky ridge (Arctic areas of the Siberian platform). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 157–167. In Rus.

Received: 10 June 2022.

Reviewed: 6 July 2022.

Information about the authors

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS; associate professor, Novosibirsk State University.

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

Anna F. Sukhorukova, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS; associate professor, Novosibirsk State University.

Anastasia A. Maksimova, assistant, Novosibirsk State University; engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

Anton S. Derkachev, student, Novosibirsk State University.

Anatoliy V. Chernykh, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

Fedor F. Dultsev, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

Albina A. Khvachevskaya, Cand. Sc., head of the scientific laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.