

УДК 551.464.3 (1-924.71)
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4759
Шифр специальности ВАК: 1.6.6

Распределение химических элементов в системе вода–порода (на примере Железнодорожного ключа в долине реки Ини)

Д.А. Новиков^{1,2✉}, Л.Г. Вакуленко^{1,3}, А.А. Максимова^{1,3}, О.Д. Николенко¹,
А.С. Деркачев¹, Я.В. Фомина (Садыкова)^{1,3}, А.А. Хвощевская⁴

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, г. Новосибирск

² Альметьевский Государственный Технологический университет «Высшая школа нефти»,
Россия, г. Альметьевск

³ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, г. Новосибирск

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. *Актуальность* работы заключается в выявлении особенностей распределения химических элементов в системе вода–порода на примере родника Железнодорожный в пределах Обь–Зайсанской складчатой области, активно используемого населением в целях нецентрализованного питьевого водоснабжения. *Цель:* выявить особенности химического и изотопного (^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra) состава родниковых вод и оценить характер равновесий в системе вода–порода. *Методы.* Лабораторное изучение химического состава подземных вод проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Данные по общей α - и β -активности природных вод, а также активностям ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra и ^{228}Ra получены в Центре коллективного пользования научным оборудованием много-элементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии СО РАН. Водовмещающие породы изучались методами поляризационной микроскопии в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН г. Новосибирск и масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой в химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск. *Результаты.* На территории исследования в основном преобладают сланцы тонкоплитчатые темно-серые, до черных, глинистые, в разной степени обогащенные примесью алевритового и углеродистого материала. Значения отношения $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} > 8$ и $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} > 1,5$ указывают на преобладание в источниках сноса магматических пород кислого состава. Для определения климатических условий был применен параметр $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$, по которому установлен гумидный климат во время образования пород. Железнодорожный ключ обладает HCO_3^- Mg–Ca составом с величиной общей минерализации 593 мг/дм³; геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh +202,7 мВ, pH 7,7 и содержанием растворенного кислорода 5,20 мг/дм³. Сравнивая химический состав описанных родниковых вод с химическим составом вмещающих пород, можно предположить, что воды наследуют их состав, что выражено в повторяющихся экстремумах. В сравнении с изученными ранее родниками долины реки Ини воды Железнодорожного ключа обогащены ураном до $4,76 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³, что превышает уровень Инских источников ($2,83 \cdot 10^{-3}$ – $4,16 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³), но ниже изученных объектов в селе Новолуговое ($3,08 \cdot 10^{-2}$ – $4,56 \cdot 10^{-2}$ мг/дм³). Уран-изотопное отношение (γ) не превышает 1,95. По результатам термодинамических расчетов воды Железнодорожного ключа равновесны с кальцитом и доломитом, а также с каолинитом, что позволяет отнести их к алюминиево-кремнистому геохимическому типу.

Ключевые слова: радоновые воды, изотопы урана и радия, система вода–порода, Железнодорожный ключ, Обь–Зайсанская складчатая область, Западная Сибирь

Благодарности: Полевые и аналитические работы по изучению химического состава природных вод выполнены при финансовой поддержке проектов Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014 и № FSWW-2023-0008, аналитические работы по исследованию геохимических особенностей горных пород – при поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Для цитирования: Распределение химических элементов в системе вода–порода (на примере Железнодорожного ключа в долине реки Ини) / Д.А. Новиков, Л.Г. Вакуленко, А.А. Максимова, О.Д. Николенко, А.С. Деркачев, Я.В. Фомина (Садыкова), А.А. Хвощевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 201–214. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4759

UDC 551.464.3 (1-924.71)
DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4759

Distribution of chemical elements in the water–rock system (based on the example of a Zheleznodorozhny spring in the valley of the Inya river)

D.A. Novikov^{1,2✉}, L.G. Vakulenko^{1,3}, A.A. Maksimova^{1,3}, O.D. Nikolenko¹,
A.S. Derkachev¹, Ya.V. Fomina (Sadykova)^{1,3}, A.A. Khvacshetskaya⁴

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Almeteyevsk State Technological University «Petroleum High School», Almeteyevsk, Russian Federation

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. The necessity to identify the characteristics of the distribution of chemical elements in the water–rock system using the example of the Zheleznodorozhny spring within the Ob-Zaisan folded region, actively used by the population for decentralized drinking water supply. **Aim.** To identify the features of the chemical and isotopic (^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra) composition of spring waters and assess the nature of the equilibrium in the water–rock system. **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. The data on the total β -activity of waters, as well as on the activities of ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra and ^{228}Ra , were obtained at the Center for Collective Use of Scientific Equipment for Multi-Element and Isotope Research Institute of Geology and Mineralogy SB RAS. Water-bearing rocks were studied using polarization microscopy at the Institute of Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, and inductively coupled plasma mass spectrometry at the Plasma Chemical Analytical Center, Tomsk. **Results.** The study area is mainly dominated by thin-platy dark gray to black clayey shales, enriched to varying degrees with silty and carbonaceous material. Values of the ratio $(\text{La}/\text{Yb})\text{N}>8$ and $(\text{Gd}/\text{Yb})\text{N}>1.5$ indicate the predominance of acidic igneous rocks in the sources. To determine climatic conditions, the parameter $\sum\text{Ce}/\sum\text{Y}$ was used, which established a humid climate during the formation of rocks. The Zheleznodorozhny spring has a HCO_3^- Mg–Ca composition with a total mineralization value of 593 mg/dm³, the geochemical parameters of the environment correspond to an oxidizing environment with Eh +202.7 mV, pH 7.7 and a dissolved oxygen content of 5.20 mg/dm³. Comparing the chemical composition of the described spring waters with the host rocks composition, it can be assumed that the waters inherit their composition, which is expressed in repeating extremes. In comparison with the previously studied springs of the Inya River valley, the waters of the Zheleznodorozhny spring are enriched with uranium up to $4.76 \cdot 10^{-3}$ mg/dm³, which exceeds the level of the Insky springs ($2.83 \cdot 10^{-3}$ – $4.16 \cdot 10^{-3}$ mg/dm³), but is lower than the studied objects in the village of Novolugovoe ($3.08 \cdot 10^{-2}$ – $4.56 \cdot 10^{-2}$ mg/dm³). The uranium isotope ratio (γ) does not exceed 1.95. According to the results of thermodynamic calculations, the waters of the Zheleznodorozhny spring are in equilibrium with calcite and dolomite, as well as with kaolinite, which allows them to be classified as an aluminum-siliceous geochemical type.

Keywords: radon waters, uranium and radium isotopes, water–rock system, Zheleznodorozhny spring, Ob-Zaisan folded region, Western Siberia

Acknowledgements: Field and analytical work to study 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 and no. FSWW-2023-0008, analytical work to study the geochemical characteristics of rocks – with the support of project no. 22-17-20029 of the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region.

For citation: Novikov D.A., Vakulenko L.G., Maksimova A.A., Nikolenko O.D., Derkachev A.S., Fomina (Sadykova) Ya.V., Khvacshetskaya A.A. Distribution of chemical elements in the water–rock system (based on the example of a Zheleznodorozhny spring in the valley of the Inya river). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 201–214. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4759

Введение

В настоящее время в научном сообществе появляется все больше работ по изучению проблем формирования химического состава подземных вод

различного изотопно-гидрогеохимического облика. Ни для кого не секрет, что в системе вода–порода первые выступают в качестве наиболее активной составляющей системы, в которой отражаются все

процессы: от природных до наложенных антропогенных. Из водного раствора определенного химического состава формируются последовательно друг за другом вторичные минеральные фазы [1]. Горные породы при этом являются основным источником поступления химических элементов в раствор.

Как отмечалось ранее, радоновые воды являются ярким результатом начальных стадий взаимодействия в системе вода–порода, поскольку радон не мигрирует на значительные расстояния от эманулирующего коллектора [2]. Во многих регионах мира степень гидрогеохимической изученности источников нецентрализованного водоснабжения населения (родников, колодцев и скважин) остается крайне низкой. Изучение состава подземных вод, включая комплекс радиохимических данных, представляет огромную важность при оценке их качества для целей питьевого водоснабжения населения. Согласно UNESCO в мире дефицит ресурсов пресных подземных вод для целей питьевого водоснабжения отмечается на всех континентах и территория Российской Федерации не является исключением, особенно когда речь идет о нецентрализованном водоснабжении населения.

Среди последних комплексных исследований распределения радионуклидов в водах питьевого назначения можно отметить работы, проведенные на территориях Индийского [3–5] и Аравийского [6–8] полуостровов, Африки [9, 10], Европы [11–13], Северной Америки [14, 15] и других [16–18]. Большое внимание этому направлению исследований отводится авторами настоящей работы [19–23]. Целью настоящей работы является получение первых данных по распределению химических элементов в системе вода–порода на примере неизученного ранее Железнодорожного ключа, где нами были выявлены повышенные по сравнению с региональным фоном Западной Сибири содержания урана, а также активность радона и изотопов урана и радия.

Материалы и методы

Во время экспедиционных работ в августе 2023 г. на территории Обь-Зайсанской складчатой области (ОЗСО) были отобраны одна проба воды и 12 образцов пород различных литотипов из обнажения ключа Железнодорожный (рис. 1), ранее были опробованы родники сравнения (12 проб). Непосредственно на объектах было выполнено определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2 , HCO_3^- с помощью оборудования (мультипараметровый измеритель pH/OBП/проводимости Hanna HI98195 и оксиметр Hanna HI98198) и полевой гидрогеохимической лаборатории. Последующее лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хромато-

графии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП) проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета (аналитики О.В. Чеботарева, Н.В. Бублий, А.С. Погуца, В.В. Куровская, К.Б. Кривцова, Л.А. Ракул). Точность используемых в анализе методов находится в диапазоне от 8 до 26 % и зависит от минерализации вод и содержания в них компонентов.

Данные по общей α - и β -активности природных вод, а также активностям ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra и ^{228}Ra 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 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). Водовмещающие породы изучались методами поляризационной микроскопии в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в химико-аналитическом центре «Плазма», г. Томск.

Геологическое строение

Объект исследования находится в центральной части ОЗСО, где палеозойский складчатый фундамент представлен сильно дислоцированными породами средне-верхнедевонского возраста, а перекрывающий их чехол – рыхлыми отложениями красnodубровской свиты нижнеэоценового возраста [24]. Объекты исследования находятся в поле распространения юргинской свиты фаменского яруса (D_3^{jur}), локально обнажающейся на небольших участках вдоль русла реки Ини. Её мощность здесь может варьировать в пределах 400–1000 м. Краснодубровская свита представлена лессоидными и лимниевыми отложениями: лессами, супесями, суглинками и песками, а также глинами от светло-желтых до бурых. Её мощность составляет порядка 40–60 м. Кроме этого, вдоль русла Ини развиты верхнечетвертичные отложения её надпойменных террас и современные пойменные отложения. Непосредственно родник Железнодорожный расположен на излучине р. Ини на подмываемом берегу в поле распространения юргинской свиты, выходящей непосредственно на дневную поверхность.

В районе исследований можно выделить 2 водоносных горизонта, существенно различающихся по своим фильтрационно-ёмкостным свойствам и литологическому составу: 1) горизонт поровых вод

краснодубровской свиты и 2) водоносная зона трещино-жильных вод юргинской свиты. Данные водоносные тела разделены мел-палеогеновой корой выветривания мощностью до 26 м, которая представлена пестроцветными глинами и может считаться водоупорным горизонтом. В низовьях Ини, по данным [25], она распространена на водоразделах и их склонах, в то время как в речных долинах

вблизи русла эродирована. Так, непосредственно в районе родника кора выветривания отсутствует на расстоянии 500–700 м от русла реки. Следовательно, водоносные горизонты в долинах рек могут иметь гидравлическую связь, а воды четвертичных отложений подпитывать водоносные зоны девонского фундамента.



Рис. 1. Местоположение отбора проб (а), фотографии ключа Железнодорожный (б, в). Условные обозначения: 1 – Железнодорожный ключ; 2 – Инские источники; 3 – родник Новолуговой; 4 – родник Капустный; 5 – породы юргинской свиты

Fig. 1. Sampling location (a), photographs of the Zheleznodorozhny spring (b, c). Legend: 1 – Zheleznodorozhny spring; 2 – Inskie springs; 3 – Novolugovoy spring; 4 – Kapustny spring; 5 – rocks of the Yurginskaya formation

Результаты и обсуждение

Геохимические особенности водовмещающих пород

Изучены водовмещающие отложения юргинской свиты, обнажающиеся в береговых выходах на р. Ини, у поселка Железнодорожный (обн. 601). Здесь преобладают сланцы темно-серые, до черных, глинистые, в разной степени обогащенные примесью алевритового и углеродистого материала, тонкоплитчатые, иногда листоватые (рис. 2, а, б). Среди темного глинистого материала отмечаются тонкие пологоволнистые слойки и линзочки серого алевро-

лита. Хорошо выражена сланцеватость, которая совпадает со слоистостью и плитчатостью либо располагается под углом к ним (рис. 2 в, г). Породы в основном слабо известковистые, с рассеянным тонкокристаллическим пиритом. Вдоль плоскостей скола отмечаются зеркала скольжения, пятнистое развитие оксидов-гидроксидов железа. Характерно проявление нескольких систем трещин с корочками или полным выполнением кальцитом, иногда совместно с кварцем.

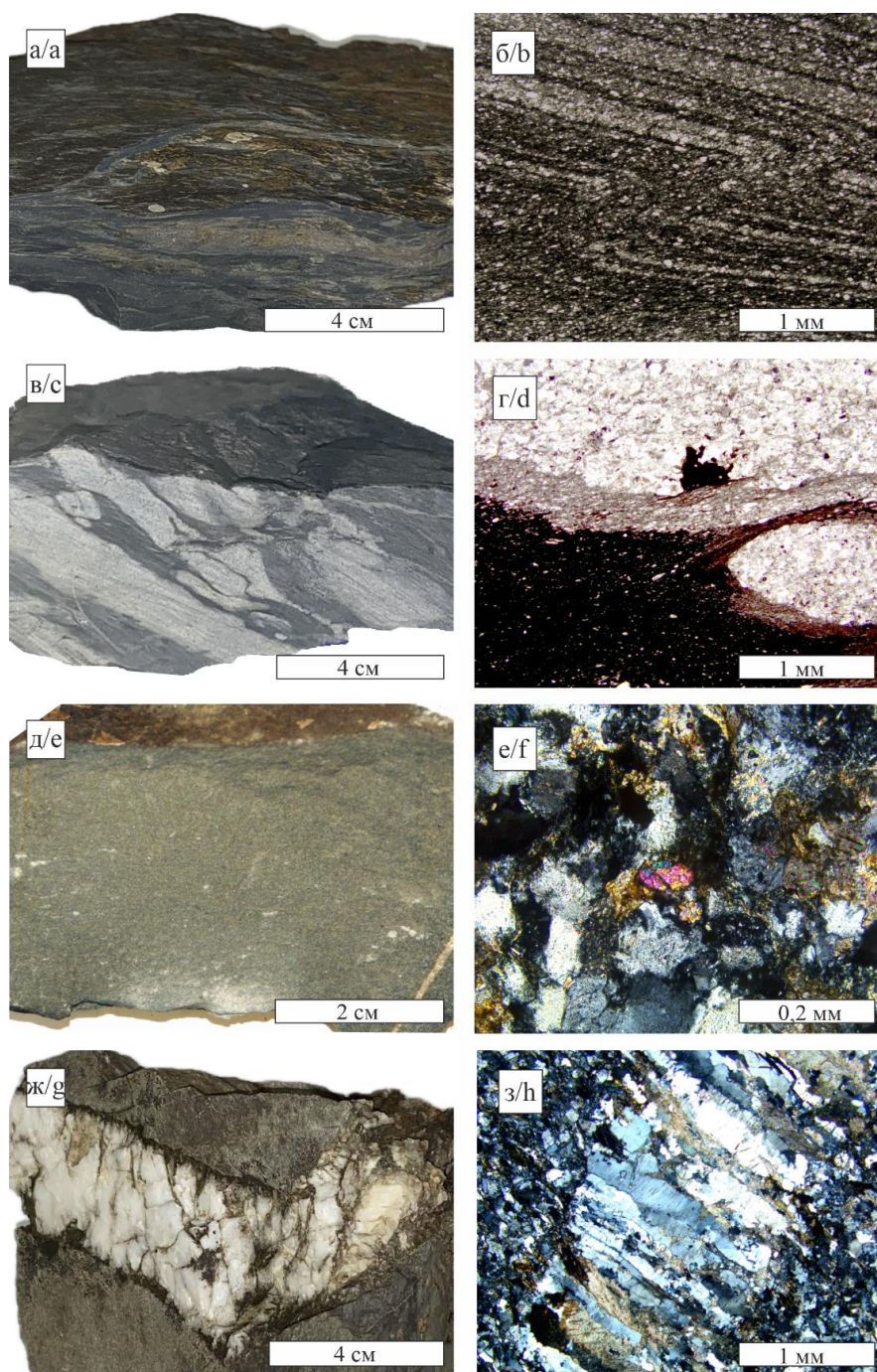


Рис. 2. Фотографии образцов и шлифов водовмещающих пород обн. 601: а, б) алеврито-глинистый сланец; в, г) переслаивание глинистого сланца и крупно-мелкозернистого алевролита; д) мелкозернистый песчаник с акцессорным цирконом (е); ж) прожилки кварца с примесью кальцита и оксидов-гидроксидов Fe; з) трещина, выполненная кварцем и кальцитом, в крупнозернистом алевролите

Fig. 2. Photos of samples and thin sections of water-bearing rocks of outcrop 601: а, b) silt-clayey shale; c, d) interbedded clayey shale and fine-grained siltstone; e) fine-grained sandstone, with accessory zircon (f); g) quartz veinlets with an admixture of calcite and Fe oxides-hydroxides; h) crack filled with quartz and calcite in coarse-grained siltstone

По результатам рентгеноструктурного анализа в составе глинистого вещества сланцев установлено близкое содержание диоктаэдрической слюды $2M_1$ мусковитового типа (15–30 % валовой пробы) и Fe-Mn-Mg хлорита (15–25 %). Значительную долю составляет кварц (20–25 %) и полевой шпат, преимущественно альбит (10–25 %). Постоянно отмечается небольшое количество карбонатных минералов: кальцита, в том числе и магнезиального (от следовых количеств до 10 %) и сидерита (<5 %). Иногда встречается акцессорный минерал псевдурит.

В меньшей степени в разрезе представлены темные, зеленовато-буровато-серые алевритопесчаные породы (рис. 2, д) полевошпатово-кварцевого состава с пленочно-поровым глинисто-кальцитовым цементом. Всегда присутствует заметное количество акцессорных титанистых минералов, циркона, иногда сфена и турмалина (рис. 2, е). О значительной степени изменения свидетельствуют: мраморизация кристаллов кальцита в цементе, проявление обильных прерывистых сутурно-стилолитовых швов, расположенных субпараллельно слоистости, выполненных глинисто-слюдисто-углеродистым материалом. Крутонаклонные трещины залечены кальцитом (рис. 2, д), иногда с черной корочкой гематита. О проявлении процессов выветривания в породах свидетельствует развитие рыжевато-коричневых пятен гидроксидов железа, которые наблюдаются и вдоль плоскостей сколов, и вдоль стенок трещин.

В разрезе отмечаются маломощные прожилки жильного кварца (до 2,5 см), располагающиеся под разными углами к слоистости (рис. 2, ж). Среди агрегатов шестоватых кристаллов кварца отмечаются мелкие пятна оксидов-гидроксидов железа, выделения кальцита (рис. 2, з).

Для изученных пород были получены результаты ИСП-МС анализа шести проб. Для более половины из 63 породообразующих и малых, в том числе редкоземельных, элементов (РЗЭ) установлены содержания, сопоставимые со средними содержаниями их в верхней части земной коры [26]. Содержания части элементов в 1,5–2,5 раза ниже, а содержания Sc, Ni, As существенно ниже во всех изученных пробах. Небольшие положительные экскурсы демонстрируют содержания Li, Be, Rb, Ba, Th, U в глинистых сланцах; Na, Cs – в алевритопесчаных породах; Se больше, чем на порядок, во всех пробах. В составе жильного кварца отмечено уменьшение содержания на один или несколько порядков большинства элементов; в 2,5–5 раз – Ca, Cr, Mn, Cu, Zn, Ge, Sr, Mo, Sb, Pb, Th; и только содержание Se на порядок выше.

Сумма РЗЭ в изученных пробах варьирует от 131,5 до 178,14 г/т. Спектры РЗЭ, нормированные

относительно постархейского австралийского сланца (PAAS), характеризуются слабо дифференцированными, практически горизонтальными кривыми, свидетельствующими об отсутствии каких-то заметных изменений состава РЗЭ относительно рассматриваемого эталона (рис. 3, а). Исключение составляет образец с повышенным содержанием Tb (601-11).

При реконструкции состава пород источников сноса анализируют спектры РЗЭ, нормированные на хондрит (C1). Величина дифференциации легких и тяжелых РЗЭ служит мерой соотношения в петрофонде кислых и основных пород. Значения отношения $(La/Yb)_N < 4$ и пологий характер кривых РЗЭ $((Gd/Yb)_N$ до 1,5) позволяют предполагать существенную роль в источниках сноса магматических пород основного состава. При значении $(La/Yb)_N > 8$ предполагается преобладание в источниках сноса пород кислого состава. Для изученных пород значения отношения $(La/Yb)_N$ варьируют от 9 до 12, характерен крутой наклон кривых РЗЭ, $(Gd/Yb)_N > 1,5$ (1,8–2,3). Все это указывает на преобладание в областях питания кислых магматических пород. Отметим, что значение $(Gd/Yb)_N$ свидетельствует о довольно высокой степени деплетированности тяжелых РЗЭ.

Наличие отрицательной Eu-аномалии типично для кислых магматических пород – $Eu/Eu^* < 0,85$, в то время как в базальтоидах $Eu/Eu^* > 0,85–0,90$ [27]. Европиевая аномалия во всех изученных образцах сланцев варьирует в пределах 0,59–0,71.

О кислом составе петрофонда можно также заключить по положению фигуративных точек составов изученных пород на тригонограмме [28]: все они расположены вблизи поля кислых пород (рис. 3, б).

Для определения примеси эксгальсионного материала в породах использовано отношение Ce/La [29, 30]. Его значения, превышающие 2, указывают на преимущественно гидрогенную природу изученных пород, где этот показатель варьирует от 2,05 до 2,18. Об отсутствии гидротермального материала свидетельствует также показатель $Zr/Hf < 50$. В изученных породах его значение варьирует от 34 до 38. Значение цериевой аномалии 0,97–1,04 отвечает окраинно-континентальным обстановкам, характеризующимся отсутствием заметного влияния металлоносных эманаций из срединно-океанических хребтов.

Некоторые элементные индикаторы могут быть использованы для реконструкции условий формирования изучаемых отложений. Для определения климатических условий был применен параметр $\Sigma Ce / \Sigma Y$ (отношение суммы LREE к HREE). Изученные породы характеризуются значениями > 4 (4,34–5,48), что указывает на гумидный климат.

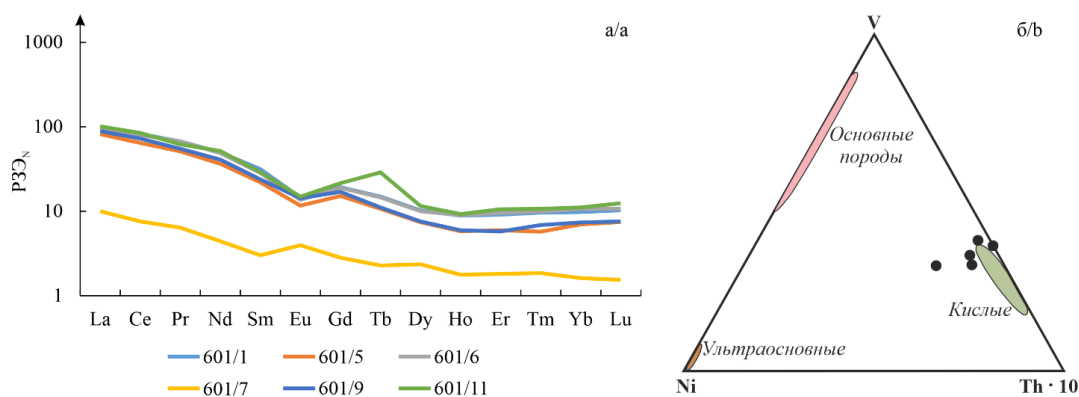


Рис. 3. Спектры редкоземельного состава водовмещающих горных пород (а) и расположение фигуративных точек составов изученных пород на тригонограмме V-Ni-Th-10 [28] (б)

Fig. 3. Rare earth spectra of water-bearing rocks (a) and location of figurative points of the composition of the studied rocks on the trigonogram V-Ni-Th-10 [28] (b)

Геохимическая характеристика родниковых вод

Воды родника Железнодорожный характеризуются гидрокарбонатным магниевым-кальциевым составом (рис. 4) с величиной общей минерализации 593 мг/дм^3 , что позволяет отнести их к собственно пресным. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с $Eh +202,7 \text{ мВ}$, $pH 7,7$ и содержанием растворенного кислорода $5,20 \text{ мг/дм}^3$. Был проведен сравнительный анализ вод родника Железнодорожный со средними содержаниями вод зоны гипергенеза [1]. В целом все содержания микрокомпонентов в воде (табл. 1) исследуемого объекта ниже, чем в объекте сравнения, но по некоторым химическим элементам есть превышения. Так, Ca и Sr больше в 3 раза, Sc в 8, Cr и I в 2, Hg в 6, U в 4. Такая ситуация может быть обусловлена тем, что выше по течению реки Иня располагается проявление радоновых вод Инские источники, где геофизическими методами установлена трещиноватая зона, а также дайка спессартитов [22]. Также в работе были рассчитаны коэффициенты концентрации (КК) и водной миграции (Кх) относительно химического состава изученных горных пород, которые показали, что в водах могут накапливаться кальций и ртуть ($КК=0,01$). По коэффициентам водной миграции установлено, что очень сильной миграционной способностью обладают кальций ($Кх=13$) и ртуть ($Кх=12$), сильной – магний ($Кх=4$), стронций ($Кх=6$), молибден ($Кх=7$), уран ($Кх=4$), средней – литий ($Кх=0,3$), натрий ($Кх=0,7$), хром ($Кх=0,2$), сурьма ($Кх=0,3$).

Редкоземельный состав родника Железнодорожный характеризуется практически полным спектром элементов, при этом концентрации гадолиния, диспрозия, эрбия и иттербия ниже предела обнаружения. Сумма легких редкоземельных элементов (ЛРЗЭ) составляет $0,11 \text{ мг/дм}^3$, тяжелых (ТРЗЭ) – $0,007 \text{ мг/дм}^3$, сумма ЛРЗЭ в 16 раз больше суммы ТРЗЭ.

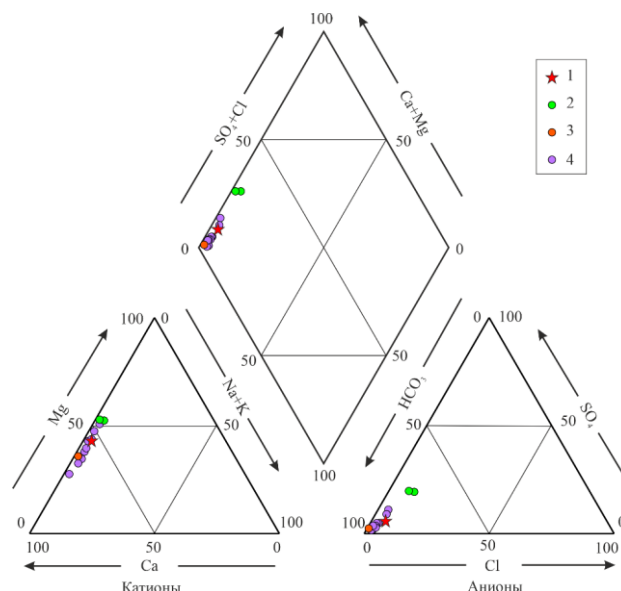


Рис. 4. Диаграмма Пайпера химического состава природных вод долины реки Иня. Условные обозначения: 1 – Железнодорожный ключ; 2 – родник Новолуговой; 3 – родник Капустный; 4 – Инские источники

Рис. 4. Piper diagram of the chemical composition of the natural waters of the Inya River valley. Legend: 1 – Zheleznodorozhny spring; 2 – Novolugovoy spring; 3 – Kapustny spring; 4 – Inskie springs

Спектр РЗЭ можно проследить до европия. От лантана до неодима спектр пологий, от неодима ($0,0007 \text{ мг/дм}^3$) до европия ($0,0095 \text{ мг/дм}^3$) наблюдается рост. Вероятно, это связано с тем, что во вмещающих породах присутствует полевой шпат и кальцит, в структуру которых может входить европий, при выщелачивании данных минералов таковой поступает в воды.

Объектами сравнения являются воды Инских источников, родников Капустный и села Новолуговое, которые разгружаются в реку Иню.

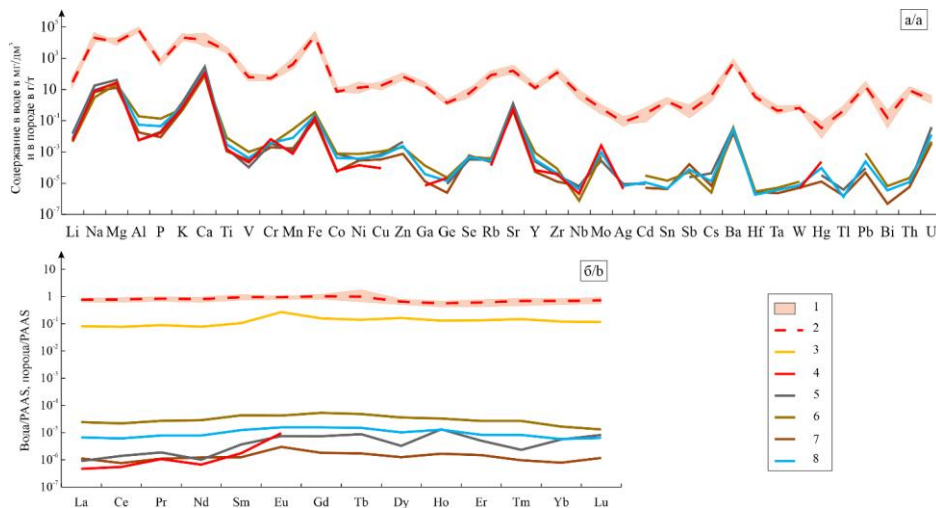


Рис. 5. Спектры распределение микрокомпонентов (а) и РЗЭ (б) в водах и вмещающих породах. Условные обозначения: 1 – глинистые сланцы; 2 – среднее по глинистым сланцам; 3 – кварцевая жила; 4 – Железнодорожный ключ; 5 – родник Новолуговой; 6 – родник Капустный; 7 – Инские источники; 8 – среднее для родников

Fig. 5. Distribution spectra of microcomponents (a) and rare earth elements (b) in waters and host rocks. Legend: 1 – clayey shales; 2 – average for clayey shales; 3 – quartz vein; 4 – Zheleznodorozhny spring; 5 – Novologovoy spring; 6 – Kapustny spring; 7 – Inskie springs; 8 – average for springs

Таблица 1. Химический состав родника Железнодорожный, данные приведены в мг/дм³, если не указано другое

Table 1. Chemical composition of the Zheleznodorozhny spring, data are given in mg/dm³, unless otherwise indicated

Компонент Component	Содержание/Content мг/дм ³ /mg/dm ³	ПДК/МАС	Компонент Component	Содержание/Content мг/дм ³ /mg/dm ³	ПДК/МАС
T, °C	+8	–	Ge	0,000021	–
pH	7,7	–	As	0,00106	0,01
Eh, мВ	+202,7	–	Br	0,049	0,2
O ₂ раств.	5,2	–	Rb	0,000133	–
²²² Rn, Бк/дм ³	68	60	Sr	0,595	7
HCO ₃ [–]	403	–	Y	0,000068	–
SO ₄ ^{2–}	24	500	Zr	0,000038	–
Cl [–]	15	350	Nb	0,000002	0,01
Ca ²⁺	114	–	Mo	0,0026	0,07
Mg ²⁺	18,3	50	Ru	0,000009	–
Na ⁺	9	200	Rh	0,000019	–
K ⁺	0,79	–	Ag	0,000004	0,05
Мин.	593	1000(1500)	Sb	0,000061	0,005
NH ₄	0,042	1,5	I	0,013	0,125
NO ₃	8,71	45	Ba	0,0212	0,7
П.ок.	0,4	5	La	0,000018	–
Li	0,0053	0,03	Ce	0,000044	–
B	0,073	0,5	Pr	0,000009	–
Al	0,0056	0,2	Nd	0,000023	–
Si	6,2	10	Sm	0,000010	–
P	0,02	–	Eu	0,000010	–
Sc	0,00059	–	Tb	0,000001	–
Ti	0,00142	0,1	Ho	0,000004	–
V	0,00021	0,1	Tm	0,000001	–
Cr	0,00650	0,05	Lu	0,000001	–
Mn	0,0008	0,1	W	0,000004	0,05
Fe	0,156	0,3	Re	0,000004	–
Co	0,000061	0,1	Hg	0,00024	0,0005
Ni	0,00014	0,02	Pb	0,00001	0,01
Cu	0,00009	1	U	0,00476	0,015
Ga	0,000007	–			

Примечание: Мин. – минерализация; П.ок. – перманганатная окисляемость; жирным выделено превышение ПДК; элементы и компоненты, концентрации которых ниже предела обнаружения: NO₂, PO₄, Be, Zn, Se, Pd, Cd, In, Sn, Te, Cs, Gd, Dy, Er, Yb, Hf, Ta, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Bi, Th; ПДК [31, 32].

Note: Min. – mineralization; P.ok. – permanganate oxidation; the maximum permissible concentration is shown in bold; elements and components with concentration below the detection limit: NO₂, PO₄, Be, Zn, Se, Pd, Cd, In, Sn, Te, Cs, Gd, Dy, Er, Yb, Hf, Ta, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Bi, Th; MPC [31, 32].

Так, воды первых двух источников такого же состава, что и родник Железнодорожный, однако в состав родниковых вод села Новолуговое входят сульфаты, и минерализация повышается до 1049 мг/дм^3 , данный родник расположен ниже по течению р. Ини, чем описанные выше, а также на территории г. Новосибирска. Также в водах установлено высокое содержание урана $0,046 \text{ мг/дм}^3$, что в 3 раза больше предельно допустимых концентраций. Спектры микрокомпонентного состава всех источников имеют одинаковый вид (рис. 5, а), что может указывать на один водоносный горизонт. Редкоземельный состав Инских источников, родников Железнодорожный и в с. Новолуговое схож между собой и находится в небольшом диапазоне значений (рис. 5, б). Однако по редкоземельному составу отличаются воды родника Капустный, где сумма ЛРЗЭ в среднем в 25 раз больше таковой в описанных выше родниках, а сумма ТРЗЭ больше в 14 раз.

Сравнивая химический состав описанных родниковых вод с химическим составом вмещающих пород, можно предположить, что воды наследуют их состав. Это выражено в повторяющихся экстремумах на графике распределения микрокомпонентного состава (рис. 5, а). Также можно заметить, что пики по некоторым элементам не совпадают, к примеру, Se, Mo, Hg и U в воде имеют максимумы, а в породе – минимумы, это может свидетельствовать о высокой миграционной способности данных элементов.

Радиохимические особенности родниковых вод

Активность радона в водах Железнодорожного ключа не превышает $68\text{--}71 \text{ Бк/дм}^3$. Среди изученных шести родников наибольшая активность ^{222}Rn

фиксируется в водах Инских источников, где она может достигать $127\text{--}130 \text{ Бк/дм}^3$ (табл. 2).

В сравнении с ранее изученными родниками долины реки Ини воды Железнодорожного ключа обогащены ураном до $4,76 \cdot 10^{-3} \text{ мг/дм}^3$, что несколько выше, чем в Инских источниках, где его концентрации варьируют в диапазоне от $2,83 \cdot 10^{-3}$ до $4,16 \cdot 10^{-3} \text{ мг/дм}^3$, но ниже концентрации в изученном роднике в селе Новолуговое ($3,08 \cdot 10^{-2}\text{--}4,56 \cdot 10^{-2} \text{ мг/дм}^3$). Содержания тория в водах Железнодорожного ключа находятся ниже их предела обнаружения, тогда как в других родниках концентрации тория составляют от $2,39 \cdot 10^{-6}$ до $1,16 \cdot 10^{-5} \text{ мг/дм}^3$ – в Инских источниках, до $2,12 \cdot 10^{-5} \text{ мг/дм}^3$ – в Капустном роднике и до $8,61 \cdot 10^{-6} \text{ мг/дм}^3$ – в роднике села Новолуговое. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношение изменяется от $1,89 \cdot 10^{-4}$ до $4,63 \cdot 10^{-3}$, что является типичным для окислительных геохимических обстановок Обь-Зайсанской складчатой области.

Активность изотопов урана и радия (мБк/дм^3) составляет в водах Железнодорожного ключа: ^{234}U – 150 ± 10 , ^{238}U – 77 ± 6 , ^{226}Ra – 17 ± 2 и ^{228}Ra – 12 ± 1 (табл. 2). Уранизотопное отношение (γ) $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в слаборадоновых водах равно 1,95. В целом полученные значения активности изотопов урана и радия незначительно превышают значения изученных ранее родников, разгружающихся в долине реки Ини. Так, суммарная β -активность вод варьирует в них от 11 ± 3 до $26 \pm 6 \text{ мБк/дм}^3$, активность (мБк/дм^3): ^{238}U 38 ± 4 – 59 ± 2 ; ^{234}U 117 ± 12 – 141 ± 4 ; ^{226}Ra 10 ± 3 – 18 ± 4 ; ^{228}Ra $0,4 \pm 0,1$ – $7,4 \pm 1,5$. Уранизотопное отношение (γ) в родниках сравнения изменяется от 2,38 до 3,21.

Таблица 2. Радионуклидный состав родников

Table 2. Radionuclide composition of springs

Радионуклиды Radionuclides	Ед. изм. Unit of measurement	Железнодорожный Zheleznodorozhny	Новолуговой Novolugovoy	Капустный Kapustnyy	Инские источники Inskie springs
^{222}Rn	Бк/дм^3 Bq/dm^3	68	<u>19–31</u> 25	28	<u>5–130</u> 69
Th	мг/дм^3 mg/dm^3	<ПО	$8,60 \cdot 10^{-6}$	$2,10 \cdot 10^{-5}$	<u>$2,40 \cdot 10^{-6}\text{--}1,20 \cdot 10^{-5}$</u> $5,70 \cdot 10^{-6}$
U		$4,76 \cdot 10^{-3}$	<u>$3,08 \cdot 10^{-2}\text{--}4,56 \cdot 10^{-2}$</u> $3,82 \cdot 10^{-2}$	$4,58 \cdot 10^{-3}$	<u>$2,83 \cdot 10^{-3}\text{--}4,16 \cdot 10^{-3}$</u> $3,64 \cdot 10^{-3}$
Th/U		–	<u>$2,40 \cdot 10^{-6}\text{--}1,20 \cdot 10^{-5}$</u> $5,70 \cdot 10^{-6}$	0,0046	<u>0,0006–0,0036</u> 0,0016
Общее бета	мБк/дм^3 mBq/dm^3	14	–	26	<u>11–15</u> 12
^{238}U		77	–	59	<u>38–48</u> 42
^{234}U		150	–	141	<u>117–124</u> 121
^{226}Ra		17	–	10	<u>14–18</u> 15
^{228}Ra		12	–	0,4	<u>5,7–7,4</u> 6,3
^{238}U	$\mu\text{гр/дм}^3$ $\mu\text{gr/dm}^3$	6,2	–	5,1	<u>3,1–3,9</u> 3,4
$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$		1,95	–	2,39	<u>2,58–3,21</u> 2,88
$^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$		1,42	–	25	<u>2,37–2,46</u> 2,42

Соотношение активностей $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ в исследованных родниковых водах варьирует от 1,4 до 25,0 при среднем значении 6,7. Это может означать, что водовмещающие породы содержат более высокие концентрации ^{226}Ra , чем ^{228}Ra . С другой стороны, это объясняется преимущественным выщелачиванием из вмещающих горных пород изотопа ^{226}Ra по сравнению с ^{228}Ra . Каждый α -распад вызывает разрушение кристаллической решетки и мобилизацию дочерних продуктов. В ряду распада урана ^{238}U изотоп ^{226}Ra образуется после трех последовательных α -распадов, в отличие от изотопа ^{228}Ra , который образуется только в результате одного α -распада изотопа ^{232}Th . Следовательно, разрушение решетки после трех α -распадов больше, чем после одного, что и обуславливает преимущественное накопление в подземных водах ^{226}Ra при взаимодействии в системе вода–порода.

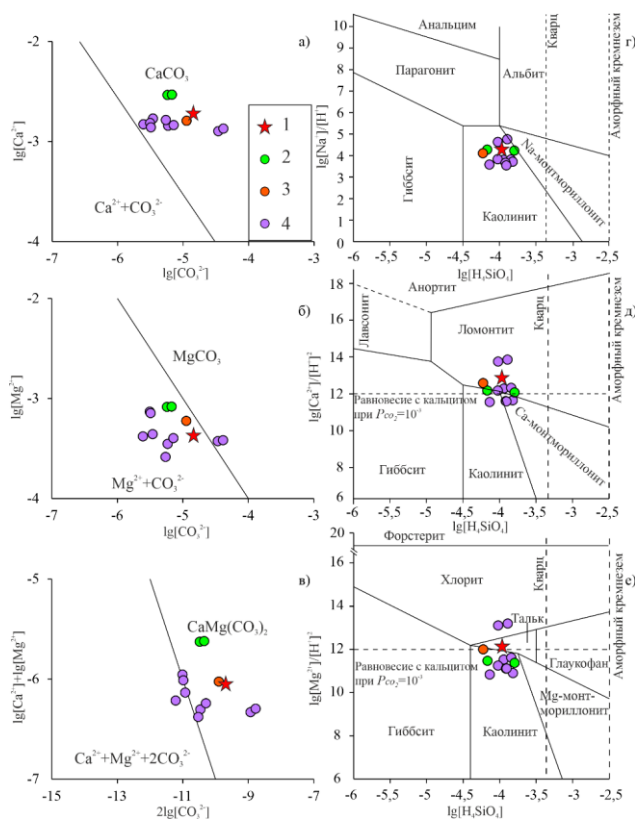


Рис. 6. Диаграммы стабильности карбонатных (а–в) и алюмосиликатных (г–е) минералов при стандартных условиях с нанесением точек состава природных вод долины реки Ини. Условные обозначения: 1 – Железнодорожный ключ; 2 – родник Новолуговой; 3 – родник Капустный; 4 – Инские источники

Fig. 6. Diagrams of stability of carbonate (a–c) and aluminosilicate (d–e) minerals under standard conditions with plotting the composition points of natural waters of the Inya River valley. Legend: 1 – Zheleznodorozhny spring; 2 – Novolugovoy spring; 3 – Kapustny spring; 4 – Inskie springs

Равновесие в системе вода – горная порода

Установлено, что практически все воды насыщены по отношению к карбонатным минералам (рис. 6, а–в), что предполагает осаждение кальцита, доломита и частично магнезита в виде вторичной минеральной фазы. Анализ термодинамических диаграмм с нанесением точек активностей компонентов состава радоновых вод показал, что они локализуются в основном в полях устойчивости слоистых силикатов (каолинит, Са-монтмориллонит, тальк) и цеолитов (ломонтит) (рис. 6, г–е). Среди причин неравновесности системы вода–порода присутствует вынос подземными водами продуктов реакции гидролиза, при которой образуется гидроксильная группа OH^- , уравнивающая заряд подвижных катионов. При этом практически вся образующаяся при гидролизе щелочность нейтрализуется формирующимися кислотными продуктами. Прежде всего это углекислый газ, который, взаимодействуя с гидроксильными группами, формирует гидрокарбонат-ион, что и подтверждается фактическими данными. В связи с этим (по классификации С.Л. Шварцева) их следует отнести к алюминиево-кремнистому геохимическому типу. Впервые для родников долины реки Ини выявлены равновесные составы подземных вод, из которых формируются вторичные минеральные фазы. Так, формирование наиболее широко распространённого в наших условиях каолинита происходит в околонейтральной среде (в среднем pH 7,4) при концентрациях кремния 3,39–9,07 мг/дм³ в растворе и алюминия 0,0002–0,19 мг/дм³.

Заключение

На территории исследования преобладают глинистые сланцы, которые по химическому составу сопоставимы с глинистыми сланцами верхней части земной коры. Значения отношений $(\text{La}/\text{Yb})_N$ $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ указывают на преобладание в областях питания кислых магматических пород.

Воды Железнодорожного ключа собственно пресные, слабощелочные с HCO_3^- Mg–Ca составом и характеризуются окислительной геохимической обстановкой. По составу микрокомпонентов можно предполагать, что воды наследуют состав вмещающих пород. В породах установлена трещиноватость и наличие пятнистой обохренности, что указывает на активное протекание процессов взаимодействия в системе вода–порода.

В водах установлена низкая активность радона-222, которая составляет 68–71 Бк/дм³, а также низкое содержание урана – $4,76 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³. Соотношение активностей $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ в исследованных родниковых водах варьирует в диапазоне от 1,4 до 25,0 при среднем значении 6,7. Это может означать, что водовмещающие породы содержат более высокие концентрации ^{226}Ra , чем ^{228}Ra . Воды равновес-

ны с кальцитом и доломитом, а также со слоистыми силикатами. Контролирующими факторами вторичного минералообразования выступают рН

среды и концентрации в растворе кремния и алюминия, что позволяет отнести данные воды к алюминиево-кремнистому геохимическому типу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
2. Роль системы вода–порода в процессах формирования состава радоновых вод Тулинского месторождения (г. Новосибирск) / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, В.П. Сухоруков, А.С. Деркачев, А.Ф. Сухорукова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, А.А. Хвощевская // Геология и геофизика. – 2024. – Т. 65. – № 12. – С. 1772–1790. DOI: 10.15372/GiG2024117.
3. Assessment of heavy metals and radionuclides in groundwater and associated human health risk appraisal in the vicinity of Rooppur nuclear power plant, Bangladesh / T.R. Choudhury, J. Ferdous, Md.M. Haque, Md.M. Rahman, S.B. Quraishi, M.S. Rahman // Journal of Contaminant Hydrology. – 2022. – Vol. 254. – Article 104072. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2022.104072.
4. Balam V., Rani A., Rathore D.P.S. Uranium in groundwater in parts of India and world: a comprehensive review of sources, impact to the environment and human health, analytical techniques, and mitigation technologies // Geosystems and Geoenvironment. – 2022. – Vol. 1. – Iss. 2. – Article 100043. DOI: 10.1016/j.geogeo.2022.100043.
5. Sukanya S., Noble J., Joseph S. Factors controlling the distribution of radon (^{222}Rn) in groundwater of a tropical mountainous river basin in southwest India // Chemosphere. – 2021. – Vol. 263. – Article 128096. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128096.
6. Natural radioactivity level in Yemen: a systematic review of radiological studies / N.N.M. Maglas, Z. Qiang, M.M.M. Ali, AL-A. Osta, M.S. Alwarqi, M. Najjar // Applied Radiation and Isotopes. – 2024. – Vol. 210. – Article 111343. DOI: 10.1016/j.apradiso.2024.111343.
7. Natural radioactivity in soil and water of Saudi Arabia: a mixed-studies review / M.F. Alotaibi, K.N. Alharbi, E.M. Alosime, L.H. Alhawali, M.M. Albarqi, R.A. Alsulami // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2024. – Vol. 17. – Iss. 2. – Article 100897. DOI: 10.1016/j.jrras.2024.100897.
8. Ahmed R.S. The concentration of radioactive materials in Iraqi soils, water and plants: a review // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2022. – Vol. 15. – Iss. 1. – P. 245–256. DOI: 10.1016/j.jrras.2022.03.012.
9. Hydrochemical and geological controls on dissolved radium and radon in northwestern Algeria hydrothermal groundwaters / Y. Zemour, N. Mebrouk, A. Mayer, I. Mekebret, M.I. Sherif // Chemosphere. – 2023. – Vol. 313. – Article 137573. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137573.
10. Radiation protection for Gabes phosphate area residents: assessing natural radioactivity in soil and potable water samples / S. Machraoui, G.A. Khouqeer, F. Hosni, S. Labidi // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2024. – Vol. 17. – Iss. 3. – Article 100985. DOI: 10.1016/j.jrras.2024.100985.
11. Borrego-Alonso D., Quintana-Arnés B., Lozano J.C. Natural radionuclides behaviour in drinking groundwaters from Castilla y León (Spain); radiological implications // Water Research. – 2023. – Vol. 245. – Article 120616. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120616.
12. Radiotoxicity and health risk assessment of ^{222}Rn in groundwater using statistical and Monte Carlo simulation approaches / M.O. Isinkaye, J.I. Agbi, S. Lewicka, M.M. Orosun, E.B. Faweya, F. Matthew-Ojelabi, Y. Ajiboye // Groundwater for Sustainable Development. – 2023. – Vol. 21. – Article 100924. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100924.
13. Borrego-Alonso D., Quintana B., Lozano J.C. Revisiting methods for the assessment of naturally-occurring radioactivity in drinking water // Applied Radiation and Isotopes. – 2023. – Vol. 193. – Article 110667. DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.110667.
14. Levels of naturally occurring radioisotopes in local and imported bottled drinking water available in Québec City, Canada / J.-C. Tremblay-Cantin, L. Martin, M. Proulx, N.D. Priest, D. Larivière // Journal of Environmental Radioactivity. – 2024. – Vol. 274. – Article 107411. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107411.
15. Groundwater uranium contamination from produced water disposal to unlined ponds in the San Joaquin Valley / R.A. Tisherman, R.J. Rossi, S.B.C. Shonkoff, D.C. DiGiulio // Science of The Total Environment. – 2023. – Vol. 904, 15. – Article 166937. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166937.
16. Understanding uranium distribution: a systematic review and meta-analysis in the context of drinking water resources / S. Abolli, N.B. Yazdi, M. Khanizadeh, K. Salemi, M.Z. Bidoki, E.A. Mehrizi // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 22. – Article 102152. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102152.
17. Smedley P.L., Kinniburgh D.G. Uranium in natural waters and the environment: distribution, speciation and impact // Applied Geochemistry. – 2023. – Vol. 148. – Article 105534. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.105534.
18. A systematic review on groundwater radon distribution with human health consequences and probable mitigation strategy / T. Nayak, S. Basak, A. Deb, P.K. Dhal // Journal of Environmental Radioactivity. – 2022. – Vol. 247. – Article 106852. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106852.
19. 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. – Vol. 15. – Article 100674. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100674.
20. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, Yu.G. Kopylova, A.N. Pyryaev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachyov, A.F. Sukhorukova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh, A.A. Khvashchinskaya, P.N. Kalinkin, A.V. Petrozhitsky // Groundwater for Sustainable Development. – 2023. – Vol. 20. – Article 100886. DOI: 10.1016/j.gsd.2022.100886.
21. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachyov, A.V. Chernykh // Geochemistry. – 2023. – Vol. 83. – Iss. 4. – Article 126016. DOI: 10.1016/j.chemer.2023.126016.
22. Об открытии слаборадоновых вод – Инские источники / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, А.Ф. Сухорукова, Л.Г. Вакуленко, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, А.Н. Фаре, А.А. Хвощевская, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, М.С. Мельгунов, П.Н. Калинин, С.А. Растигеев // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 12. – С. 1714–1732.

23. Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Новобибеевского проявления радоновых вод / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, А.Н. Фаге, А.А. Хвашевская, А.С. Деркачев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 57–72.
24. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (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. Елифанов, Ю.И. Лоскутов, И.Ю. Лоскутов, М.В. Михаревич, Е.А. Пихутин. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 392 с.
25. Геологическая карта и карта полезных ископаемых дочетвертичных образований. Масштаб: 1:200000, N-44-XII, серия: Кузбасская / под ред. А.Б. Гиндингер. – Новосибирск: Новосибирское территориальное геологическое управление, 1960.
26. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 383 с.
27. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. – Blackwell, Oxford: Cambridge University Press, 1985. – 312 p.
28. Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins / L. Bracciali, M. Marroni, L. Pandolfi, S. Rocchi // Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspective for Petrography and Geochemistry Geological Society of American Special Paper / Eds. J. Arribas, S. Cretelli, M.J. Johnson. – USA, 2007. – Vol. 73. – 93 p.
29. Стрекопытов С.В., Дубинин А.В., Волков И.И. Общие закономерности поведения редкоземельных элементов в пелагических осадках Тихого океана // Литология и полезные ископаемые. – 1999. – № 2. – С. 133–145.
30. Дубинин А.В., Волков И.И. Редкоземельные элементы в металлоносных осадках Восточно-Тихоокеанского поднятия // Геохимия. – 1986. – № 5. – С. 645–662.
31. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2003 N 78 (ред. от 13.07.2017) «О введении в действие ГН 2.1.5.1315-03» (вместе с «ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 27.04.2003) (Зарегистрировано в Минюсте России 19.05.2003 N 4550).
32. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий (с изменениями на 26 июня 2021 года). – М.: Государственная дума РФ, 2021. – 65 с.

Информация об авторах

Дмитрий Анатольевич Новиков, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6 научный консультант Департамента нефтегазового инжиниринга Передовой инженерной нефтяной школы Альметьевского Государственного Технологического университета «Высшая школа нефти», Россия, 423462, г. Альметьевск, ул. Советская, 186А. NovikovDA@ipgg.sbras.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9016-3281>

Людмила Галериевна Вакуленко, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6; доцент Новосибирского национального исследовательского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1. VakylenkoLG@ipgg.sbras.ru

Анастасия Алексеевна Максимова, младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6; ассистент кафедры минералогии и геохимии Новосибирского национального исследовательского университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1. rock.nastaya64@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5068-555X>

Остап Дмитриевич Николенко, ведущий инженер лаборатории седиментологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6. NikolenkoOD@ipgg.sbras.ru

Антон Сергеевич Деркачев, младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6. a.derkachev@g.nsu.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6101-6573>

Яна Владиславовна Фомина (Садыкова), кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Коптюга, 3/6; старший научный сотрудник Новосибирского национального исследовательского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1. SadykovaYV@ipgg.sbras.ru

Альбина Анатольевна Хвощевская, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, unpc_voda@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4494-2609>

Поступила в редакцию: 01.07.2024

Поступила после рецензирования: 17.01.2025

Принята к публикации: 03.02.2025

REFERENCES

1. Shvartsev S.L. *Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone*. Moscow, Nedra Publ., 1998. 366 p. (In Russ.)
2. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Sukhorukov V.P., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashchenskaya A.A., Medeshova N.A. Role of the water-rock system in the formation of the composition of radon water of the Tulinskoe Field (Novosibirsk). *Russian Geology and Geophysics*, 2024, vol. 65, Iss. 12, pp. 1503–1518. DOI: 10.2113/RGG20244716 (In Russ.)
3. Choudhury T.R., Ferdous J., Haque Md.M., Rahman Md.M., Quraishi S.B., Rahman M.S. Assessment of heavy metals and radionuclides in groundwater and associated human health risk appraisal in the vicinity of Rooppur nuclear power plant, Bangladesh. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2022, vol. 254, article 104072. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2022.104072.
4. Balam V., Rani A., Rathore D.P.S. Uranium in groundwater in parts of India and world: A comprehensive review of sources, impact to the environment and human health, analytical techniques, and mitigation technologies. *Geosystems and Geoenvironment*, 2022, vol. 1, Iss. 2, article 100043. DOI: 10.1016/j.geogeo.2022.100043.
5. Sukanya S., Noble J., Joseph S. Factors controlling the distribution of radon (^{222}Rn) in groundwater of a tropical mountainous river basin in southwest India. *Chemosphere*, 2021, vol. 263, article 128096. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128096.
6. Maglas N.N.M., Qiang Z., Ali M.M.M., AL-Osta A., Alwarqi M.S., Najar M. Natural radioactivity level in Yemen: A systematic review of radiological studies. *Applied Radiation and Isotopes*, 2024, vol. 210, article 111343. DOI: 10.1016/j.apradiso.2024.111343.
7. Alotaibi M.F., Alharbi K.N., Alosime E.M., Alhawali L.H., Albarqi M.M., Alsulami R.A. Natural radioactivity in soil and water of Saudi Arabia: A mixed-studies review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2024, vol. 17, Iss. 2, article 100897. DOI: 10.1016/j.jrras.2024.100897.
8. Ahmed R.S. The concentration of radioactive materials in Iraqi soils, water and plants: a review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2022, vol. 15, Iss. 1, pp. 245–256. DOI: 10.1016/j.jrras.2022.03.012.
9. Zemour Y., Mebrouk N., Mayer A., Mekebret I., Sherif M.I. Hydrochemical and geological controls on dissolved radium and radon in northwestern Algeria hydrothermal groundwaters. *Chemosphere*, 2023, vol. 313, article. 137573. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137573.
10. Machraoui S., Khouqeer G.A., Hosni F., Labidi S. Radiation protection for Gabes phosphate area residents: Assessing natural radioactivity in soil and potable water samples. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2024, vol. 17, Iss. 3, article 100985. DOI: 10.1016/j.jrras.2024.100985.
11. Borrego-Alonso D., Quintana-Arnés B., Lozano J.C. Natural radionuclides behaviour in drinking groundwaters from Castilla y León (Spain); radiological implications. *Water Research*, 2023, vol. 245, article 120616. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120616.
12. Isinkaye M.O., Agbi J.I., Lewicka S., Orosun M.M., Faweya E.B., Matthew-Ojelabi F., Ajiboye Y. Radiotoxicity and health risk assessment of ^{222}Rn in groundwater using statistical and Monte Carlo simulation approaches. *Groundwater for Sustainable Development*, 2023, vol. 21, article 100924. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100924.
13. Borrego-Alonso D., Quintana B., Lozano J.C. Revisiting methods for the assessment of naturally-occurring radioactivity in drinking water. *Applied Radiation and Isotopes*, 2023, vol. 193, article 110667. DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.110667.
14. Tremblay-Cantin J.-C., Martin L., Proulx M., Priest N.D., Larivière D. Levels of naturally occurring radioisotopes in local and imported bottled drinking water available in Québec City, Canada. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2024, vol. 274, article 107411. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107411.
15. Tisherman R.A., Rossi R.J., Shonkoff S.B.C., DiGiulio D.C. Groundwater uranium contamination from produced water disposal to unlined ponds in the San Joaquin Valley. *Science of The Total Environment*, 2023, vol. 904, 15, article 166937. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166937.
16. Abolli S., Yazdi N.B., Khanizadeh M., Salemi K., Bidoki M.Z., Mehrizi E.A. Understanding uranium distribution: A systematic review and meta-analysis in the context of drinking water resources. *Results in Engineering*, 2024, vol. 22, article 102152. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102152.
17. Smedley P.L., Kinniburgh D.G. Uranium in natural waters and the environment: Distribution, speciation and impact. *Applied Geochemistry*, 2023, vol. 148, article 105534. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.105534.
18. Nayak T., Basak S., Deb A., Dhal P.K. A systematic review on groundwater radon distribution with human health consequences and probable mitigation strategy. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2022, vol. 247, article 106852. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106852.
19. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, 15, article 100674. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100674.
20. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashchenskaya A.A., Kalinkin P.N., Petrozhitsky A.V. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2023, 20, article 100886. DOI: 10.1016/j.gsd.2022.100886.

21. Novikov D.A., Dultsev F.F., Maximova A.A., Derkachyov A.S., Chernykh A.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia. *Geochemistry*, 2023, vol. 83. Iss. 4, article 126016. DOI: 10.1016/j.chemer.2023.126016.
22. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Sukhorukova A.F., Vakulenko L.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Faguet A.N., Khvashchevskaya A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Mel'gunov M.S., Kalinkin P.N., Rastigeev S.A. The Inskie springs: new insights into low-radon waters. *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, Iss. 12, pp. 1424–1441. DOI: 10.2113/RGG20214337 (In Russ.)
23. 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 Novobibeevo occurrence of radon-rich waters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 57–72 DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3447. (In Russ.)
24. 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. *State geological map of the Russian Federation*. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet N-44 – Novosibirsk. Explanatory letter. St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory Publ., 2015. 392 p. (In Russ.)
25. *Geological map and map of mineral resources of pre-Quaternary formations*. Scale: 1:200000, N-44-XII, series: Kuzbass. Ed. by A.B. Ginzinger. Novosibirsk, Novosibirsk Territorial Geological Department Publ., 1960. (In Russ.)
26. Grigoriev N.A. *Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009. 383 p. (In Russ.)
27. Taylor S.R., McLennan S.M. *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, Cambridge University Press, 1985. 312 p.
28. Bracciali L., Marroni M., Pandolfi L., Rocchi S. *Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins*. Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspective for Petrography and Geochemistry. Geological Society of American Special Paper 420: 2007. pp. 73–93.
29. Strekopytov S.V., Dubinin A.V., Volkov I.I. General patterns of behavior of rare earth elements in pelagic sediments of the Pacific Ocean. *Lithology and minerals*, 1999, no. 2, pp. 133–145. (In Russ.)
30. Dubinin A.V., Volkov I.I. Rare earth elements in metalliferous sediments of the East Pacific Rise. *Geochemistry*, 1986, no. 5, pp. 645–662. (In Russ.)
31. *Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 30.04.2003 N 78 (as amended on 13.07.2017) "On the introduction of GN 2.1.5.1315-03" (together with "GN 2.1.5.1315-03. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in water bodies for domestic and drinking water use and cultural and household water use. Hygienic standards", approved. by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on 27.04.2003) (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 19.05.2003 N 4550)*. (In Russ.)
32. *SanPiN 2.1.3684-21 Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of the territories of urban and rural settlements, water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial, public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures (as amended on June 26, 2021)*. Moscow, State Duma of the Russian Federation Publ., 2021. 65 p. (In Russ.)

Information about the authors

Dmitry A. Novikov, Cand. Sc., Head of the Laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Scientific Consultant, Almeteyevsk State Technological University «Petroleum High School», 186A, Sovetskaya street, Almeteyevsk, 423462, Russian Federation. NovikovDA@ipgg.sbras.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9016-3281>

Lyudmila G. Vakulenko, Leading Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Associate Professor, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. Vakylenkog@ipgg.sbras.ru

Anastasia A. Maksimova, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Assistant, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. rock.nastaya64@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5068-555X>

Ostap D. Nikolenko, Lead Engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. NikolenkoOD@ipgg.sbras.ru

Anton S. Derkachev, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. a.derkachev@g.nsu.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6101-6573>

Yana V. Fomina (Sadykova), Cand. Sc., Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation; Senior Researcher, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. SadykovaYV@ipgg.sbras.ru

Albina A. Khvashchevskaya, Cand. Sc., Head of the Scientific Laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. unpc_voda@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4494-2609>

Received: 01.07.2024

Revised: 17.01.2025

Accepted: 03.02.2025