

УДК 551.464.3 (1-924.71)
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4766
Шифр специальности ВАК: 1.6.6

Уран в подземных водах Северного Казахстана

Н.А. Медешова¹, Д.А. Новиков^{2,3✉}, Е.С. Ауелхан¹, А.А. Антоненко¹,
А.А. Максимова^{2,3}, А.С. Деркачев², Ф.Ф. Дульцев², А.М. Орынбек⁴,
Ш.Д. Минискул¹, А.В. Черных², А.А. Хвощевская⁵

¹ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
Казахстан, г. Алматы

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, г. Новосибирск

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

⁴ АО «Волковгеология», Казахстан, г. Алматы

⁵ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. **Актуальность** работы заключается в выявлении особенностей распределения радиоактивных элементов в подземных водах Северного Казахстана. **Цель:** обобщение имеющихся данных по геохимии подземных вод и распределению в них урана и радона на примере северных районов Республики Казахстан. **Методы.** Обобщение многолетних гидрогеохимических исследований и составление электронного банка данных по территории Северного Казахстана. Лабораторное изучение химического состава подземных вод проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Измерение содержаний ^{222}Rn в водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. **Результаты.** Изучены подземные воды разновозрастных водоносных горизонтов, распространенных на территории Северного Казахстана (Северо-Казахстанская урановорудная провинция). Установлены две геохимические совокупности подземных вод. Первая характеризуется доминированием в составе вод HCO_3^- и Mg^{2+} , а вторая – Cl^- и Na^+ . Изменение состава и рост величины общей минерализации с 0,1 до 49 г/дм³ в направлении с севера на юг указывают на развитие процессов континентального засоления. В природных водах первой группы содержания урана изменяются от 0,065 до 16000 мкг/дм³ и активность радона от 4 до 3885 Бк/дм³. Для хлоридных натриевых вод второй совокупности концентрации могут достигать 32500 мкг/дм³, а активность радона составляет 6–59 Бк/дм³, поскольку эманурующий коллектор (гранитоиды) расположен севернее – на расстоянии 80–100 км. Закономерно источниками урана выступают гранитоидные массивы изучаемого региона. Их дренирование речной сетью приводит к его выносу и концентрированию на геохимических барьерах в подземных водах неоген-четвертичного водоносного горизонта. Такое распространение радиоактивных элементов связано с высокой миграционной способностью урана в растворе в форме уранил-иона в окислительных геохимических обстановках.

Ключевые слова: радоновые воды, уран-238, радон-222, Северный Казахстан, Обь-Зайсанская складчатая область

Благодарности: Обобщение гидрогеохимических материалов по Северному Казахстану выполнено при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки Республики Казахстан № AP22685193, аналитические работы по изучению химического состава подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области – при поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Для цитирования: Уран в подземных водах Северного Казахстана / Н.А. Медешова, Д.А. Новиков, Е.С. Ауелхан, А.А. Антоненко, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, Ф.Ф. Дульцев, А.М. Орынбек, Ш.Д. Минискул, А.В. Черных, А.А. Хвощевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 203–215. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4766

UDC 551.464.3 (1-924.71)

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4766

Uranium in groundwaters of North Kazakhstan

N.A. Medeshova¹, D.A. Novikov^{2,3}✉, E.S. Auelkhan¹, A.A. Antonenko¹,
A.A. Maksimova^{2,3}, A.S. Derkachev², F.F. Dultsev², A.M. Orynbeke⁴,
Sh.D. Miniskul¹, A.V. Chernykh², A.A. Khvacshetskaya⁵

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

⁴ Volkovgeology JSC, Almaty, Kazakhstan

⁵ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. The need to identify the characteristics of the distribution of radioactive elements in the groundwater of Northern Kazakhstan. **Aim.** Generalization of available data on the geochemistry of groundwater and uranium and radon distribution in them using the example of the northern regions of the Republic of Kazakhstan. **Methods.** Generalization of long-term hydrogeochemical research and compilation of an electronic data bank on the territory of Northern Kazakhstan. A laboratory study of the chemical composition of groundwater was carried out at the Research Laboratory of Hydrogeochemistry of the School of Natural Resources Engineering of Tomsk Polytechnic University. Measurements of ²²²Rn contents in waters were carried out using the Alfarad Plus complex in the Laboratory of Hydrogeology of Sedimentary Basins of Siberia, Institute of Geology and Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. **Results.** The groundwater of aquifers of different ages, distributed in the territory of Northern Kazakhstan (North Kazakhstan uranium province), was studied. Two geochemical sets of groundwater were identified. The first is characterized by the dominance of HCO₃⁻ and Mg²⁺ in the water composition, and the second by Cl⁻ and Na⁺. A change in composition and an increase in the value of total mineralization from 0.1 to 49 g/dm³, in the direction from north to south, indicate the development of continental salinization. In natural waters of the first group, uranium content varies from 0.065 to 16000 µg/dm³ and radon activity from 4 to 3885 Bq/dm³. For sodium chloride waters of the second set, concentrations can reach 32500 µg/dm³, and radon activity is 6–59 Bq/dm³, since the emanating reservoir (granitoids) is located to the north – at a distance of 80–100 km. Naturally, granitoid massifs of the studied region are sources of uranium. Their drainage by the river network leads to its removal and concentration on geochemical barriers in the groundwater of the Neogene-Quaternary aquifer. This distribution of radioactive elements is associated with the high migration ability of uranium in solution in the form of uranyl ion in oxidizing geochemical conditions.

Keywords: radon waters, uranium-238, radon-222, Northern Kazakhstan, Ob-Zaisan folded region

Acknowledgements: A generalization of hydrogeochemical materials for Northern Kazakhstan was carried out with the financial support of a grant from the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan no. AP22685193, analytical work to study the chemical composition of groundwater in the Ob-Zaisan folded region – with the support of project no. 22-17-20029 of the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region.

For citation: Medeshova N.A., Novikov D.A., Auelkhan E.S., Antonenko A.A., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Dultsev F.F., Orynbeke A.M., Miniskul Sh.D., Chernykh A.V., Khvacshetskaya A.A. Uranium in groundwaters of North Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 203–215. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4766

Введение

Во многих регионах мира степень гидрогеохимической изученности источников нецентрализованного водоснабжения населения (родников, колодцев и водозаборных скважин) остается крайне низкой. Изучение состава подземных вод различного изотопно-геохимического облика, включая комплекс радиохимических данных, представляет огромную важность при оценке их качества для целей питьевого водоснабжения населения. Рекон-

струкция процессов миграции, переноса, рассеивания и концентрирования химических элементов, особенно радионуклидов, в разных геохимических средах вызывает огромный интерес в мировом научном сообществе. Распределение химических элементов в разных типах подземных вод и их поведение при водной миграции до настоящего времени вызывает большую дискуссию, как и рудообразующая роль системы вода–порода. Основными источниками растворенных в водах веществ высту-

пают в первую очередь горные породы и органическое вещество. Для того чтобы определить, каково было влияние водовмещающих пород на изотопно-геохимические особенности вод, детально изучаются их изотопный и микрокомпонентный состав. Анализируются фазы-концентраторы микрокомпонентов, изучается их устойчивость в водной среде.

Актуальные работы по изучению распределения радиоактивных элементов (в первую очередь урана) в подземных водах различных гидрогеологических структур связаны с исследованиями во многих регионах мира: Китае [1–4], Корее [5], России [6], Индии [7–9], Бразилии [10], Эфиопии [11], Намибии [12], Афганистане [13], США [14], Канаде [15], Германии [16] и т. д. К сожалению, по подземным водам Республики Казахстан таких обобщений в последние годы не было. В этой связи целью настоящей работы является обобщение имеющихся данных по геохимии подземных вод и распределению в них урана и радона на примере северных районов Республики Казахстан (Северо-Казахстанская урановорудная провинция). В качестве объекта сравнения рассмотрены подземные воды Обь-Зайсанской складчатой области (часть Кулундино-Енисейской урановорудной зоны) в граничных районах Российской Федерации, где было открыто Пригородное месторождение урана (рис. 1).

Материалы и методы

Проведено обобщение фондовых данных по подземным водам Северного Казахстана (электронная база данных с результатами гидрогеохимического опробования составляет 310 записей). Было проведено сравнение этих данных с данными по подземным водам Обь-Зайсанской складчатой области, которые изучены методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в ПНИЛ гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ. Название химического типа воды дано в соответствии с формулой М.Г. Курлова (более 10 %-экв) по оттеночному принципу от меньшего к большему. Измерение содержаний ^{222}Rn в водах проводилось на комплексе «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Особенности геологического строения и гидрогеологии

Казахстан обладает крупными запасами урана. Урановые месторождения распространены как в палеозойском складчатом основании, так и в мезозой-кайнозойском платформенном чехле. Палеозойские гидротермальные месторождения урана

связаны с девонским краевым вулканно-плутоническим поясом. Они известны как в самом вулканно-плутоническом поясе, так и в тыловой магматической дуге этого пояса. В обоих случаях месторождения урана приурочены к тем участкам, где под магматогенными породами пояса имеется докембрийский фундамент: в вулканно-плутонической дуге ураноносна его юго-западная ветвь, а в тыловом магматическом поясе – часть, приуроченная к Кокчетавской глыбе и ее обрамлению, многочисленны урановые месторождения мезозой-кайнозойского платформенного чехла. Наибольший промышленный интерес представляют эпигенетические пластово-инфильтрационные месторождения региональных зон пластового окисления в мел-палеогеновых отложениях. Многочисленные экзодиагенетические грунтово-инфильтрационные урановые проявления встречаются по всему разрезу мезозой-кайнозойского платформенного чехла от триаса до четвертичных отложений. Они приурочены к континентальным палеодолинно-пойменным-аллювиальным отложениям и по запасам редко достигают масштабов мелкого месторождения [17, 18].

Исследуемая территория в геологическом плане относится к территории Западно-Сибирской низменности, Тургайской ложбины, Казахстанской складчатой системы и юго-восточной части Уральских гор. Геологическое строение обуславливает разделение площади на следующие гидрогеологические бассейны: Большеуральский на западе, Приарало-Тургайско-Шу-Сарысуский на юго-западе, Шынгыс-Кокшетауский и Тениз-Коргалжынский на юге, а также Западно-Сибирский бассейн, охватывающий северо-запад, север и восток. В географическом плане, район исследования расположен в пределах полупустынной зоны. Многообразие факторов, определяющих гидрогеологические условия, обуславливает различие в количестве и качестве природных вод, распространенных на территории Северного Казахстана. К этим факторам относятся: климат, рельеф, характер зоны аэрации, геологическое строение и физико-механические свойства водовмещающих пород.

В геологическом строении изучаемой территории принимают участие два типа структур: приподнятые горноскладчатые области и разграничивающие их прогибы фундамента. Прогибы заполнены значительной толщей рыхлых мезозой-кайнозойских осадочных отложений. Водонесные горизонты в прогибах разделены водоупорными толщами и образуют крупные артезианские бассейны, а воды относятся к пластово-поровому типу. В горноскладчатых областях, в свою очередь, воды безнапорные трещинные и пластово-трещинные [19].

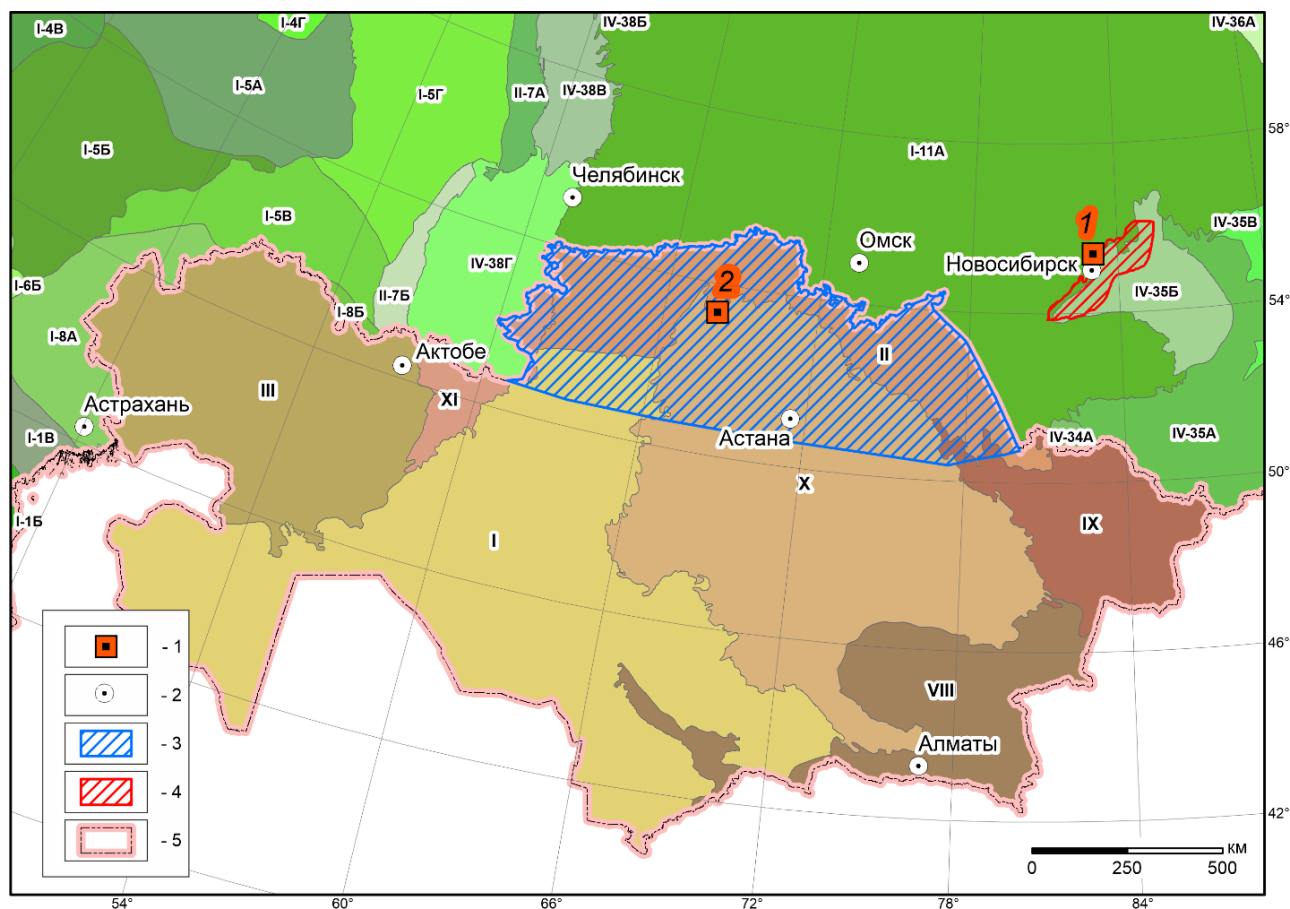


Рис. 1. Местоположение района исследований. Условные обозначения: 1 – месторождение урана: 1 – Пригородное, 2 – Грачевское; 2 – крупный город; 3 – территория исследования в пределах республики Казахстан; 4 – территория исследований в пределах России (фрагмент Обь-Зайсанской складчатой области); 5 – государственная граница. Гидрогеологические структуры в пределах России: I-1Б – Восточно-Предкавказский АБ; I-1В – Ергенинский АБ; I-4А – Северо-Двинский АБ; I-4В – Московский АБ; I-4Г – Ветлужский АБ; I-5А – Волго-Сурский АБ; I-5Б – Приволжско-Хоперский АБ; I-5В – Сыртовский АБ; I-5Г – Камско-Вятский АБ; I-6Б – Донецко-Донской АБ; I-8А – Северо-Каспийский АБ; I-8Б – Эмбенский АБ; II-7А – Юрюзано-Сылвинский ПАБ; II-7Б – Бельский ПАБ; I-10Б – Печорский АБ; I-10В – Печеро-Предуральский ПАБ; I-11А – Иртыш-Обской АБ; I-11Б – Тазовско-Пурский АБ; I-14А – Камо-Вельминский АБ; I-14Е – Восточно-Енисейский АБ; IV-10А – Канино-Тиманская ГСО; IV-34А – Жарминско-Алтайская ГСО; IV-35А – Алтае-Саянская ГСО; IV-35Б – Кузнецкая ГСО; IV-36А – Северо-Енисейская ГСО; IV-38Б – Северо-Уральская ГСО; IV-38Г – Южно-Уральская ГСО. Гидрогеологические структуры в пределах Казахстана: I – Скифско-Туранический регион; II – Западно-Сибирский регион; III – Восточно-Европейский регион; VIII – Жетысу-Алатау-Тянь-Шаньский регион; IX – Енисей-Саяно-Алтайский регион; X – Центрально-Казахстанский регион; XI – Таймыро-Уральский регион

Fig. 1. Location of the study area. Legend: 1 – uranium deposit: 1 – Prigorodnoe, 2 – Grachevskoe; 2 – large city; 3 – study area within the Republic of Kazakhstan; 4 – research area within Russia (fragment of the Ob-Zaisan folded region); 5 – state border. Hydrogeological structures within Russia: I-1B – East Pre-Caucasian AB; I-1B – Ergeninsky AB; I-4A – North Dvina AB; I-4B – Moscow AB; I-4G – Vetluzhsky AB; I-5A – Volgo-Sursky AB; I-5B – Privolzhsko-Khopersky AB; I-5B – Syrtovsky AB; I-5G – Kama-Vyatsky AB; I-6B – Donetsk-Don AB; I-8A – North Caspian AB; I-8B – Embensky AB; II-7A – Yuryuzano-Sylvinsky PAB; II-7B – Belsky PAB; I-10B – Pechora AB; I-10B – Pechero-Preduralsky PUB; I-11A – Irtysh-Ob AB; I-11B – Tazovsko-Pursky AB; I-14A – Kamo-Velminsky AB; I-14E – East Yenisei AB; IV-10A – Kaniino-Timan GSO; IV-34A – Zharminsko-Altai GSO; IV-35A – Altai-Sayan GSO; IV-35B – Kuznetsk GSO; IV-36A – North Yenisei GSO; IV-38B – North Ural GSO; IV-38B – Sredneurskaya GSO; IV-38G – South Ural GSO. Hydrogeological structures within Kazakhstan: I – Scythian-Turanian region; II – West Siberian region; III – Eastern European region; VIII – Zhetysu-Alatau-Tien Shan region; IX – Yenisei-Sayan-Altai region; X – Central Kazakhstan region; XI – Taimyr-Ural region

Степень выветривания и трещинноватости пород, рельеф территории контролируют глубину циркуляции, водообильность и качество подземных вод в пределах горноскладчатых областей. К зонам тектонических нарушений приурочены значительные глубины циркуляции (150 м и более), там же располагаются наиболее водообильные участки. Меньшей водообильностью обладают трещинноватые эффузивные породы, где трещины залечиваются кальцитом и глиной. Минерализация вод значительно различается в зависимости от типа структур. Пресные воды находятся в трещинноватых породах, выходящих на дневную поверхность. Слабо-минерализованные воды обнаруживаются в районах горноскладчатых областей. Соленоватые и соленые воды локализованы в пределах участков, где скальные породы перекрыты водоупорными отложениями коры выветривания, в качестве которых выступают глины палеогенового, неогенового и четвертичного возрастов [19].

Территории Тургайской ложбины и Западно-Сибирской низменности характеризуются развитием крупных артезианских бассейнов, разделенных структурными поднятиями. Главными гидрогеологическими подразделениями являются выдержанные на значительных площадях водоносные горизонты мелового, эоценового и олигоценового возраста. Преобладающие в разрезе глинистые толщи затрудняют инфильтрацию атмосферных осадков и

способствуют формированию вод повышенной минерализации. Благоприятные условия для инфильтрационных процессов и питания близких к дневной поверхности водоносных горизонтов создаются лишь на участках выходов хорошо водопроницаемых пород [19].

Особенности гидрогеохимии

Подземные воды Шынгыс-Кокшетауского бассейна характеризуются преимущественно $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3\text{ Na-Ca-Mg}$ составом (рис. 2, а) с величиной общей минерализации, изменяющейся от 0,1 до 11,4 г/дм³. Воды нейтральные, слабощелочные и щелочные (рН 6,6–8,9). Гидрогеологический разрез бассейна представлен осадочными отложениями кембрийского, ордовикского, силурийского, девонского, каменноугольного, пермского, триасового, палеогенового и четвертичного возрастов. Величина общей минерализации подземных вод меняется незакономерно, наблюдается инверсионный тип вертикальной гидрогеохимической зональности. Так, в водах, приуроченных к кембрийско-силурийским отложениям, она составляет 1,1–1,4 г/дм³, девонским и каменноугольным – 2,1–2,3 г/дм³, пермским – 1,1 г/дм³, триасовым – 2,2 г/дм³, палеогеновым – 1,3 г/дм³ и четвертичным – 2,2 г/дм³. Значения геохимических коэффициентов в среднем равны для Ca/Na 0,81, Ca/Mg 1,81, rNa/rCl 3,01, SO_4/Cl 2,26 (рис. 3, а, б).

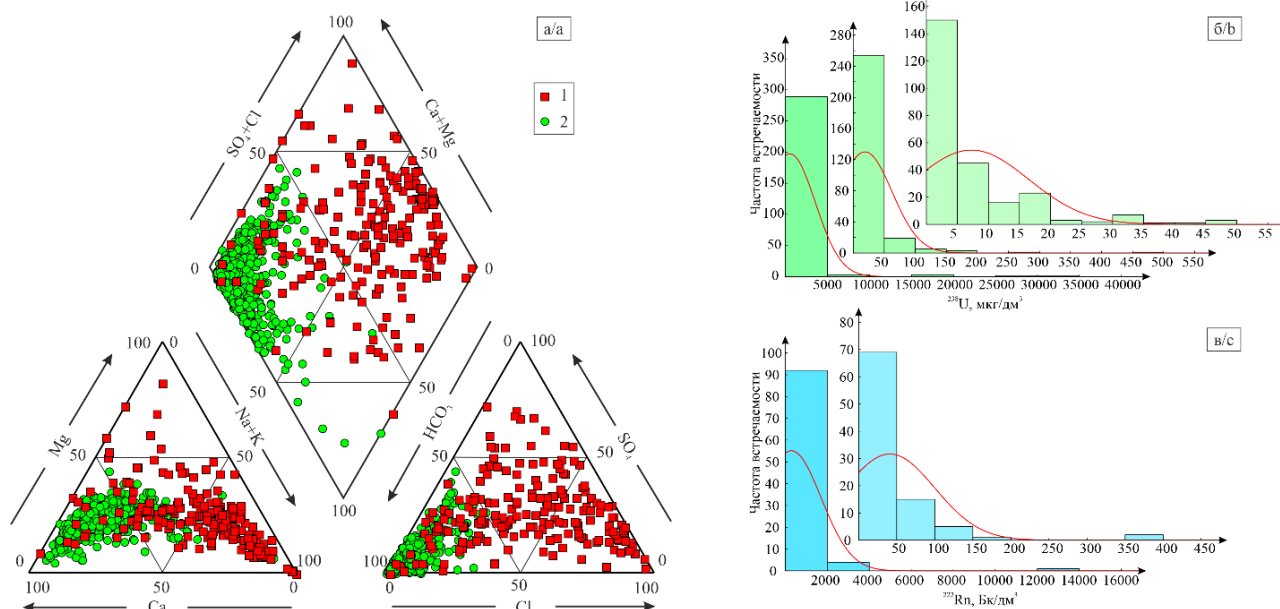


Рис. 2. Диаграмма Пайпера химического состава подземных вод (а) Северного Казахстана (1) и Обь-Зайсанской складчатой области (2); распределение урана-238 (б) и радона-222 (в) в подземных водах Северного Казахстана

Fig. 2. Piper diagram of the chemical composition of groundwater (a) in Northern Kazakhstan (1) and the Ob-Zaisan folded region (2) and the distribution of uranium-238 (b) and radon-222 (c) in groundwater in Northern Kazakhstan

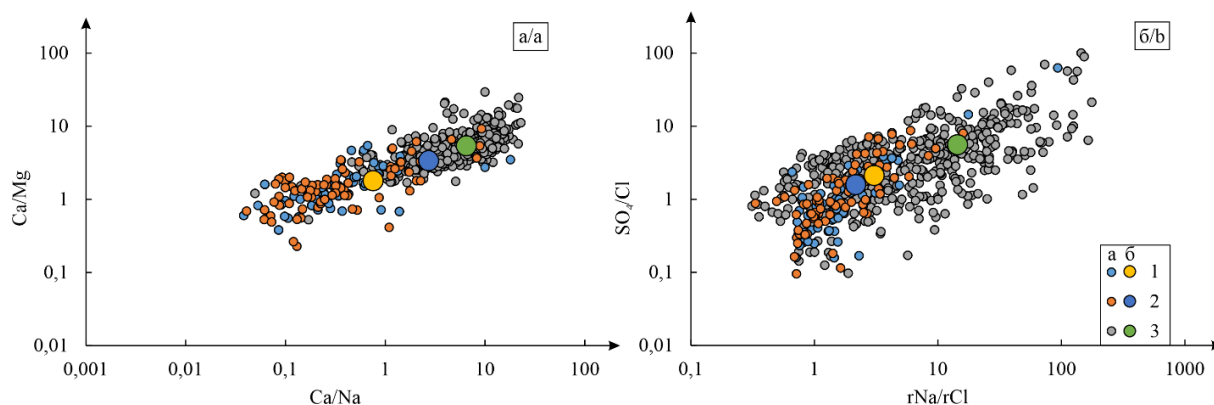


Рис. 3. Геохимическая типизация природных вод по коэффициентам Ca/Mg – Ca/Na (а), SO_4/Cl – rNa/rCl (б); 1 – подземные воды Шынгыс-Кокшетауского бассейна (а) и среднее по ним (б); 2 – подземные воды Тениз-Коргалжынского бассейна (а) и среднее по ним (б); 3 – подземные воды Обь-Зайсанской складчатой области (а) и среднее по ним (б)

Fig. 3. Geochemical typification of natural waters according to the coefficients Ca/Mg – Ca/Na (a), SO_4/Cl – rNa/rCl (b); 1 – groundwater of the Shyngys-Kokshetau basin (a) and the average for them (b); 2 – groundwater of the Teniz-Korgalzhyn basin (a) and the average for them (b); 3 – groundwater of the Ob-Zaisan folded region (a) and the average for them (b)

Подземные воды Тениз-Коргалжынского бассейна в основном $\text{SO}_4\text{--Cl}$ Ca – Mg – Na состава с величиной общей минерализации, изменяющейся в широком диапазоне от 0,2 до 49 г/дм³. Воды также нейтральные, слабощелочные и щелочные (рН 6,5–9,1). Установлено, что величина общей минерализации значительно изменяется в водах, приуроченных к отложениям пермского, палеогенового, неогенового и четвертичного возрастов, и в среднем составляет 3,4, 7,6, 3,4 и 4,2 г/дм³ соответственно. В водах отложений кембрийско-каменноугольного возраста минерализация в среднем изменяется от 1,0 до 2,2 г/дм³. Тип гидрогеохимической зональности также инверсионный. Значения геохимических коэффициентов Ca/Na и Ca/Mg сопоставимы с таковыми в водах Шынгыс-Кокшетауского бассейна и составляют 0,87 и 1,93, однако выявлено небольшое понижение в величинах отношений rNa/rCl (2,29) и SO_4/Cl (1,88) (рис. 3, а, б).

В Приарало-Тургайско-Шу-Сарысуком бассейне развиты подземные воды $\text{SO}_4\text{--HCO}_3$ Na – Mg – Ca состава с величиной общей минерализации 0,3–2,1 г/дм³. Воды нейтральные (рН 7–7,5) и слабощелочные (рН 7,6). Значения Ca/Na и Ca/Mg возрастают относительно описанных выше бассейнов и составляют 1,77 и 3,40 соответственно, а величины rNa/rCl (1,17) и SO_4/Cl (1,07) снижаются (рис. 3, а, б).

В граничных районах Западно-Сибирского артезианского бассейна распространены подземные воды смешанного состава при доминировании соленоватых и соленых вод с преобладанием хлорид-иона 1,15–17,6 г/дм³ и иона натрия 1,09–7,56 г/дм³. Величина общей минерализации изменяется от 0,3 до 35,5 г/дм³, воды нейтральные, слабощелочные и щелочные (рН 6,7–9,6). Они отличаются наиболее высокими из изученных средними значениями ко-

эффициента Ca/Na , который составляет 7,84. Средние величины Ca/Mg (1,80) находятся на уровне вод Шынгыс-Кокшетауского и Тениз-Коргалжынского бассейнов, а средние значения rNa/rCl и SO_4/Cl не превышают 2,30 и 1,14 соответственно (рис. 3, а, б).

В качестве объекта сравнения в граничных районах Российской Федерации рассматривается часть Кулундино-Енисейской урановорудной зоны в пределах Обь-Зайсанской складчатой области (ОЗСО) [20, 21]. Здесь распространены нейтральные и слабощелочные (рН 6,5–8,4) преимущественно HCO_3 Mg – Ca и HCO_3 Mg – Ca – Na воды (рис. 2, а) с величиной общей минерализации 0,2–1,6 г/дм³. Значения геохимических коэффициентов в среднем составляют для Ca/Na 6,48, Ca/Mg 5,37, rNa/rCl 14,41, SO_4/Cl 5,59, что значительно больше, чем в водах на территории Северного Казахстана. Главной особенностью этого региона является отсутствие процессов континентального засоления и наличие в гидрогеологическом разрезе прямой (нормальной) вертикальной гидрогеохимической зональности (рис. 3, а, б).

В пределах Северо-Казахстанской урановорудной провинции отмечается отчетливая дифференциация химических элементов и соединений в составе изученных вод. Наиболее ярко это видно в изменении состава вод в направлении от Шынгыс-Кокшетауского к Тениз-Коргалжынского бассейнов. Так, в первом доминируют гидрокарбонат-ион и ион магния, а во втором – хлорид-ион и ион натрия. Также заметно возрастает величина общей минерализации, которая в первом случае в среднем составляет 1,6 г/дм³, а во втором – 3,3 г/дм³. Такое распределение компонентов указывает на смену обстановок формирования вод от нормальных, в

условиях гумидного климата, до яркого проявления процессов континентального засоления – в аридном. Что также подтверждается сравнением с подземными водами ОЗСО, состав которых формируется в умеренном климатическом поясе. По геохимическим коэффициентам подтверждается взаимодействие вод Шынгыс-Кокшетауского и Тениз-Коргалжынского бассейнов с алюмосиликатными породами. Однако относительно высокие значения Ca/Mg в Приарало-Тургайско-Шу-Сарысуком и Западно-Сибирском бассейнах указывают на повышенную долю карбонатной составляющей во вмещающих горных породах (рис. 3, а, б).

Анализ имеющихся данных показал, что в пределах изучаемого региона наиболее высокие содержания урана характеризуют подземные воды Шынгыс-Кокшетауского и Тениз-Коргалжынского бассейнов. В этой связи дальнейшее рассмотрение радиохимических материалов будет сосредоточено на этих гидрогеологических структурах.

Уран в природных водах

В пределах исследуемых структур содержания ^{238}U в подземных водах изменяются на шесть математических порядков и варьируют от 0,005 до 32500 мкг/дм³, составляя в среднем 519,3 мкг/дм³ (рис. 2, б, таблица). Максимальные значения кон-

центраций более 16000 мкг/дм³ установлены в западной части Тениз-Коргалжынского артезианского бассейна (юго-запад территории исследования), южной, западной и северо-западной частях Шынгыс-Кокшетауского артезианского бассейна (центр и северо-запад территории исследования) (рис. 4). Активность ^{222}Rn варьирует в широких пределах от первых единиц до 4000 Бк/дм³, составляя в среднем 185 Бк/дм³. В пределах Тениз-Коргалжынского артезианского бассейна его активность не превышает 60 Бк/дм³, в Шынгыс-Кокшетауском артезианском бассейне изменяется от 3,7 до 3885 Бк/дм³, в среднем составляя 280 Бк/дм³ (рис. 2, в).

В границах Тениз-Коргалжынского артезианского бассейна содержания урана в подземных водах изменяются от 0,005 до 32500 мкг/дм³, составляя в среднем 1267 мкг/дм³. Максимальными концентрациями характеризуются подземные воды западной части бассейна (р-н города Атбасар), в центральных районах они могут достигать 3000–6500 мкг/дм³, на востоке установлены воды с диапазонами значений до 1000–1500 мкг/дм³ (рис. 4). Наиболее обогащенные ураном подземные воды выявлены преимущественно в водоносных комплексах каменноугольного и четвертичного возрастов на глубинах до 30 м, где его концентрации превышают 3000 мкг/дм³.

Таблица. Распределение урана и радона в подземных водах Северного Казахстана

Table. Uranium and radon distribution in groundwater in Northern Kazakhstan

Возраст Age	Химический тип Chemical type	М	pH	²³⁸ U	²²² Rn	Кол-во проб Number of samples
		г/дм³/g/dm³		мкг/дм³/kg/dm³	Бк/дм³/Bk/dm³	шт./un.
Гидрогеологические подразделения Северного Казахстана/Hydrogeological units of Northern Kazakhstan						
Q	SO ₄ -Cl-HCO ₃ Mg-Na-Ca	<u>0.2-49</u> 2,8	<u>6.6-8.3</u> 7,5	<u>0.1-32500</u> 832	<u>4-107</u> 31	75
N	SO ₄ -Cl-HCO ₃ Mg-Ca	<u>0.3-35</u> 6,2	<u>7.1-8.2</u> 7,6	<u>0.7-26000</u> 1548	11	19
P	SO ₄ -HCO ₃ Na-Mg-Ca	<u>0.2-21</u> 3,0	<u>6.7-9.6</u> 7,3	<u>0.1-4870</u> 179	<u>2-15</u> 9	30
K	SO ₄ -Cl Mg-Ca-Na	8,2	7,4	0,5	-	1
T	SO ₄ -HCO ₃ -Cl Ca-Mg-Na	2,2	7,9	23	-	1
P	HCO ₃ -SO ₄ -Cl Mg-Na	<u>0.5-13</u> 2,3	<u>6.5-8.4</u> 7,4	<u>0.01-98</u> 11	<u>9-90</u> 27	27
C	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Mg-Ca-Na	<u>0.2-28</u> 3,3	<u>6.6-9.1</u> 7,6	<u>0.2-16200</u> 790	<u>7-55</u> 25	52
D	SO ₄ -Cl-HCO ₃ Ca-Mg-Na	<u>0.2-6.2</u> 2,1	<u>7.0-8.3</u> 7,5	<u>0.13-16200</u> 906	<u>40-370</u> 150	22
S	SO ₄ -Cl Ca-Mg-Na	<u>1.4-9.4</u> 5,4	7,7	<u>1.3-16.3</u> 7,5	22	3
O	SO ₄ -Cl Ca-Mg-Na	<u>0.1-5.9</u> 1,4	<u>7.0-8.9</u> 7,7	<u>0.1-162</u> 21	<u>6-2960</u> 263	28
Є	Cl-SO ₄ -HCO ₃ Na-Mg-Ca	<u>0.4-3.1</u> 1,4	<u>6.9-7.7</u> 7,3	<u>2-487</u> 76	<u>6-3885</u> 1466	11
Гидрогеологические подразделения Обь-Зайсанской складчатой области Hydrogeological units of the Ob-Zaisan folded region						
C	HCO ₃ Mg-Na-Ca	<u>0.3-1.3</u> 0,7	<u>7.4-8.0</u> 7,7	<u>0.04-13</u> 3	<u>2-68</u> 32	23
D	HCO ₃ Mg-Ca	<u>0.2-1.5</u> 0,6	<u>6.1-8.3</u> 7,5	<u>0.0007-200</u> 3,8	<u>1-1161</u> 46	374
Є	HCO ₃ Mg-Ca	<u>0.3-0.8</u> 0,5	<u>7.1-8.0</u> 7,4	<u>0.8-4.6</u> 2,4	<u>2-32</u> 10	17

Примечание/Note: М – минерализация/mineralization.

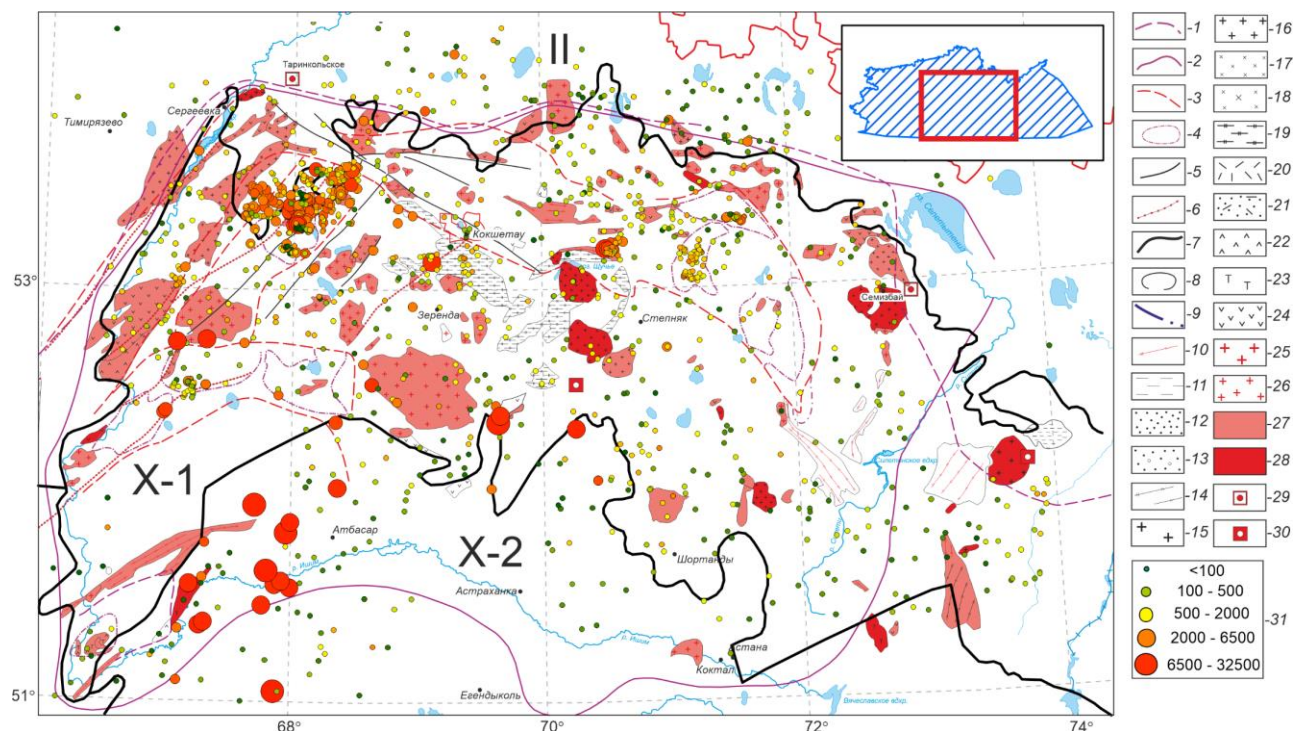


Рис. 4. Радиоэкологическая карта Северного Казахстана. Контуры палеозойских металлогенических подразделений: 1 – металлогенический пояс с потенциальной ураноносностью; 2 – урановорудные провинции; 3 – урановорудные и редкометалльно-уран-ториевые структурно-металлогенические зоны; 4 – урановорудные районы; Разрывные нарушения: 5 – установленные 1 порядка; 6 – разрывные нарушения – каналы поступления радионуклидов; 7 – границы гидрогеологических подразделений: II – Западно-Сибирский регион; X-1 – Шынгыс-Кокшетауский бассейн; X-2 – Тениз-Коргалжинский бассейн; 8 – контуры геологических формаций; Границы выклинивания ЗПО: 9 – области распространения торийсодержащих редкоземельно-титановых россыпей; 10 – кремнисто-углеродистые сланцы; Литологические типы пород с повышенным радиационным фоном: Осадочные – 11 – угленосные; 12 – песчаные; 13 – песчано-гравелистые; 14 – кремнисто-углеродистые сланцы, углеродистые песчаники; Интрузивные – 15 – аляскитовые граниты; 16 – нормальные граниты; 17 – гранодиориты; 18 – диориты; 19 – гранитизированные метаморфиты; Вулканогенные: 20 – риолиты; 21 – туфы риолитов; 22 – дациты; 23 – трахиты; 24 – андезиты; Специализированные на уран и торий горные породы $U > 10$ г/т, $Th > 35$ г/т: 25 – аляскиты; 26 – граниты; Поля распространения геологических формаций с высокими содержаниями урана и тория: 27 – $U - 5-10$ г/т; $Th - 10-35$ г/т; 28 – $U > 10$ г/т; $Th > 35$ г/т; В мезозойско-кайнозойских отложениях – 29 – экзодиагенетические урановые проявления в сероцветных отложениях палеодолин; 30 – то же в существенно глинистых аллювиально-озерных отложениях; 31 – содержание урана в пробе воды, $\mu\text{г}/\text{дм}^3$

Fig. 4. Radioecological map of Northern Kazakhstan. Contours of Paleozoic metallogenic units: 1 – metallogenic belt with potential uranium content; 2 – uranium ore provinces; 3 – uranium ore and rare metal-uranium-thorium structural-metallogenic zones; 4 – uranium ore areas; Rupture violations: 5 – established 1st order; 6 – discontinuities – channels for the entry of radionuclides; 7 – boundaries of hydrogeological divisions: II – West Siberian region; X-1 – Shyngys-Kokshetau basin; X-2 – Teniz-Korgalzhinsky basin; 8 – contours of geological formations; Boundaries of WPO pinchout: 9 – areas of distribution of thorium-containing rare-earth-titanium placers; 10 – siliceous-carbonaceous shales; Lithological types of rocks with increased background radiation: Sedimentary – 11 – coal-bearing; 12 – sandy; 13 – sand-gravelite; 14 – siliceous-carbonaceous shales, carbonaceous sandstones; Intrusive – 15 – alaskite granites; 16 – normal granites; 17 – granodiorites; 18 – diorites; 19 – granitized metamorphites; Volcanogenic: 20 – rhyolites; 21 – rhyolite tuffs; 22 – dacites; 23 – trachytes; 24 – andesites; Rocks specialized for uranium and thorium $U > 10$ g/t, $Th > 35$ g/t: 25 – alaskites; 26 – granites; Fields of distribution of geological formations with high contents of uranium and thorium: 27 – $U - 5-10$ g/t; $Th - 10-35$ g/t; 28 – $U > 10$ g/t; $Th > 35$ g/t; In Mesozoic-Cenozoic deposits – 29 – exodiagenetic uranium occurrences in gray sediments of paleovalleys; 30 – the same in essentially clayey alluvial-lacustrine deposits; 31 – uranium content in the water sample, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$

Установленные при гидрогеохимическом опробовании водоносных комплексов кембрийского, ордовикского, девонского и пермского возрастов содержания ^{238}U варьируют от 0,01 до 50 $\mu\text{г}/\text{дм}^3$, в некоторых случаях достигая 162–487 $\mu\text{г}/\text{дм}^3$

(рис. 5, а, таблица). Максимальная активность радона-222 (40–60 $\text{Бк}/\text{дм}^3$) установлена в песчаниках ордовикского, девонского, каменноугольного и пермского комплексов (рис. 5, б, таблица).

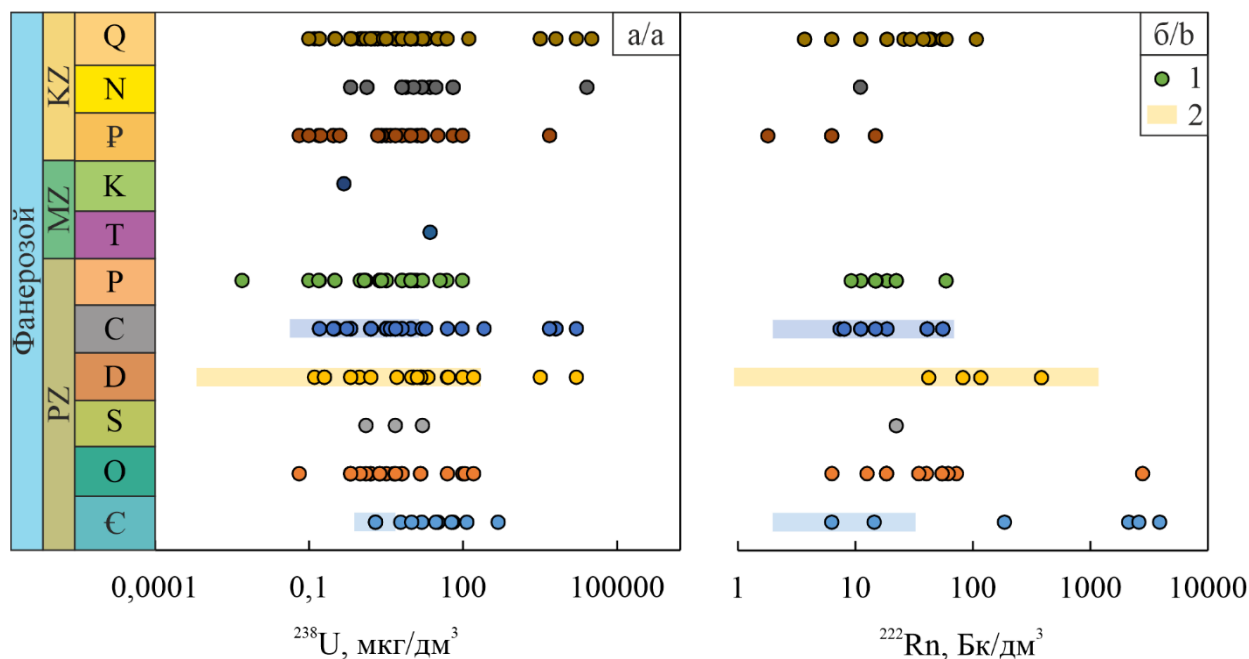


Рис. 5. Распределение урана-238 (а) и радона-222 (б) в разновозрастных водоносных горизонтах, развитых на территории Северного Казахстана. Условные обозначения: 1 – Северный Казахстан; 2 – Обь-Зайсанская складчатая область

Fig. 5. Distribution of uranium-238 (a) and radon-222 (b) in aquifers of different ages developed in Northern Kazakhstan. Legend: 1 – Northern Kazakhstan; 2 – Ob-Zaisan folded region

Концентрации урана в подземных водах Шынгыс-Кокшетауского артезианского бассейна заметно ниже, чем в Тениз-Коргалжынском, и изменяются в диапазоне 0,07–16200 мкг/дм³ при среднем 180 мкг/дм³. Максимальные значения выше 16000 мкг/дм³ установлены в подземных водах переходной зоны бассейнов, в скважине близ села Суворовка. Высокие концентрации ²³⁸U (6500–8000 мкг/дм³) характеризуют подземные воды западной (р-н села Чистополье), северо-западной (р-н села Саулманколь) и северной (окрестности г. Щучинск) частей бассейна (рис. 4). Остальная территория характеризуется содержаниями урана до 2000–4000 мкг/дм³, за исключением восточных районов, где отмечены его минимальные значения (до 100 мкг/дм³). Наиболее обогащенные ураном подземные воды относятся к водоносным комплексам девонского и каменноугольного возрастов (рис. 5, а, таблица). Аномально высокие активности радона-222 более 2000 Бк/дм³ обнаружены в подземных водах кембрийского и ордовикского водоносных горизонтов. В остальных пробах она не превышает 370 Бк/дм³, составляя в среднем 53 Бк/дм³. Наименьшая активность ²²²Rn зафиксирована в водоносных комплексах палеогенового и четвертичного возрастов (рис. 5, б, таблица).

Схожими условиями строения с изучаемой территорией исследования обладает ОЗСО, расположенная в граничных районах Российской Федера-

ции (рис. 1). Здесь распространены гранитоидные массивы пермо-триасового возраста, оказывающие большое влияние на радиоэкологическое состояние региона. Для сравнения их особенностей были выбраны подземные воды водоносных комплексов кембрийского, девонского, каменноугольного возрастов и вод, развитых в пределах гранитных комплексов. Установлено, что содержания ²³⁸U в подземных водах ОЗСО изменяются от 0,0007 до 200 мкг/дм³ в девонских комплексах, в каменноугольном от 0,05 до 13 мкг/дм³, в кембрийском до 5 мкг/дм³ и в гранитных образованиях от 0,005 до 348 мкг/дм³ (рис. 5, а). Активность ²²²Rn в подземных водах в ОЗСО может достигать 43763 Бк/дм³ [22]. В водах девонских отложений активность радона варьирует от 1 до 1161 Бк/дм³, в каменноугольных – от 2 до 68 Бк/дм³, кембрийских – 2–32 Бк/дм³ и гранитных массивах от 1 до 597 Бк/дм³ (рис. 5, б). Таким образом, установлено, что концентрации урана-238 в подземных водах ОЗСО ниже или совпадают с концентрациями в пределах изучаемой территории, при этом активность радона-222 в водоносных комплексах девонского возраста ОЗСО может превышать на порядки таковую в регионе исследования, что связано с наличием в пределах ОЗСО разломной тектоники, а также туфов, туфоконгломератов и глинистых сланцев в составе буготакской и тогучинской нерасчлененных свит девонского возраста.

Заключение

На исследуемой территории выявлена дифференциация химических элементов и соединений в составе изученных вод, которая указывает на смену условий их формирования от нормальных к условиям континентального засоления. По геохимическим коэффициентам подтверждается взаимодействие вод с алюмосиликатными породами. Однако относительно высокие значения Ca/Mg указывают на повышенную долю карбонатной составляющей во вмещающих горных породах.

Установлено, что высокие содержания урана (до 32500 мкг/дм³) приурочены к водам неоген-четвертичного водоносного комплекса Тениз-

Коргальжынского бассейна, распространенным в поймах рек Ишим, Терсаккан. Более низкие концентрации урана проявлены в поле распространения гранитоидных массивов на территории Шынгыс-Кокшетауского артезианского бассейна. Закономерно источниками урана выступают гранитоидные массивы изучаемого региона. Их дренирование речной сетью приводит к его выносу и концентрированию на геохимических барьерах в подземных водах неоген-четвертичного водоносного горизонта. Такое распространение радиоактивных элементов связано с высокой миграционной способностью урана в растворе в форме уранил-иона в окислительных геохимических обстановках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The behavior of pyrite during in-situ leaching of uranium by CO₂+O₂: a case study of the Qianjiadian uranium deposit in the Songliao Basin, northeastern China / Y. Fan, H. Song, Z. Wang, N. Gan, C. Zhang, B. Zhao, Z. Xu, Y. Tan // *Ore Geology Reviews*. – 2024. – Vol. 169. – Article 106085. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106085
2. Jurassic sedimentary evolution model and its implication for the sandstone-type uranium mineralization in the Kamusite area in eastern Junggar Basin, NW China / H. Ji, J. Zhong, Z. He, H. Chen, Z. Li, M. Qin, B. Zhu, Y. Wu, Q. Dong // *Ore Geology Reviews*. – 2024. – Vol. 168. – Article 106042. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106042
3. Effects of uranium mining on soil bacterial communities and functions in the Qinghai-Tibet plateau / Q. Li, Z. Xiong, P. Xiang, L. Zhou, T. Zhang, Q. Wu, C. Zhao // *Chemosphere*. – 2024. – Vol. 347. – Article 140715. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140715
4. Hydrogeochemical characteristics and enrichment regularities of groundwater uranium in the Erlan Basin, China / B. Zhang, T. Yan, X. Wang, Y. Qiao, H. Liu, B. Zhang // *Applied Geochemistry*. – 2024. – Article 106094. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106094
5. Health risk assessment of uranium intake from private residential drinking groundwater facilities based on geological characteristics across the Republic of Korea / S. Hashemi, I. Shin, S.-O. Kim, W.-C. Lee, S.-W. Lee, D. H. Jeong, M.S. Kim, H. Kim, Ji. Yang // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 913. – Article 169252. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169252
6. Уран и торий в системе вода–порода (на примере нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири) / Д.А. Новиков, Л.Г. Вакуленко, П.А. Ян, А.А. Хвощевская // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. – 2023. – № 3 (55). – С. 78–88. DOI: 10.20403/2078-0575-2023-3-78-88
7. Verma M., Loganathan V.A. Hydrogeochemical constraints on uranium contamination of groundwater for drinking water supplies and associated health risks // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2023. – Vol. 23. – Article 100973. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100973
8. Mapping of uranium in groundwater of Mysuru district, Karnataka, India and radiation dose to the population / B.S.K. Lavanya, S.N. Namitha, M. Hidayath, B.S. Prathibha, M.S. Chandrashekar // *Nuclear and Particle Physics Proceedings*. – 2023. – Vol. 341. – P. 22–27. DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2023.09.011
9. Rajput U., Swami D., Joshi N. Geospatial analysis of toxic metal contamination in groundwater and associated health risks in the lower Himalayan industrial region // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 938. – Article 173328. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173328
10. Uranium anomaly in groundwater of the hard rock aquifer system in southeast Brazil / T. de P. Marteleto, A.E.S. de Abreu, M.B.Barbosa, S. Yoshinaga-Pereira, R.A. Bertolo, J. Enzweiler // *Journal of South American Earth Sciences*. – 2024. – Vol. 133. – Article 104733. DOI: 10.1016/j.jsames.2023.104733
11. Tracing contaminants of emerging concern in the Awash River basin, Ethiopia / K. Hailu, S. Kebede, B. Birhanu, D. Lapworth // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2024. – Vol. 54. – Article 101869. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101869
12. New insights into the flow dynamics of a deep freshwater aquifer in the semi-arid and saline Cuvelai-Etoshia Basin, Northern Namibia: results of a multi-environmental tracer study / R. Bäuml, R. Purtschert, P. Mueller, T. Krekeler, J.C. Zappala, T. Matsumoto, J. Gröger-Trampe, P. Koeniger, C. Vockenhuber, N. Romeo, J. Mabry // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2024. – Vol. 52. – Article 101721. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101721
13. Geochemical evolution of spring waters in carbonate dominated aquifer in Upper Shirin Tagab sub-basin, northern Afghanistan / A. Zaryab, A. Farahmand, Z. Jafari, S. Ali, F. Alijani, H.R. Nassery // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2024. – Vol. 25. – Article 101102. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101102
14. 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. – Article 166937. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166937
15. Richard D., Rafini S., Walter J. Natural metal contents and influence of salinization in deep Canadian Shield groundwater: Base level versus mineral deposit enrichment halos // *Applied Geochemistry*. – 2024. – Vol. 170. – Article 106078. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106078

16. Nitrate-induced mobilization of trace elements in reduced groundwater environments / J. Filter, C. Schröder, F. El-Athman, U. Dippon-Deissler, G.J. Houben, D. Mahringer // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 927. – Article. 171961. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171961
17. Жолтаев Г.Ж., Жуков Н.М., Антоненко А.А. Атлас закономерностей размещения месторождений твердых полезных ископаемых Республики Казахстан. – Алматы: ТОО «Институт геологических наук им. К.И. Сатпаева», 2023. – 265 с.
18. Урановые месторождения Казахстана: (экзогенные) / Н.Н. Петров, В.Г. Язиков, Х.Б. Аубакиров, В.Н. Плеханов, А.Ф. Вершков, В.Ф. Лухтин. – Алматы: Гылым, 1995. – 264 с.
19. Гидрогеология СССР. Т. 33. Северный Казахстан / под ред. П.М. Фролов. – М.: Недра, 1966. – 363 с.
20. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, Yu.G. Kopylova, A.N. Pyryaev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachev, A.F. Sukhorukova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh, A.A. Khvashchevskaya, 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. Maximova, A.S. Derkachyov, A.V. Chernykh // *Geochemistry*. – 2023. – Vol. 83. – Iss. 4. – Article 126016. DOI: 10.1016/j.chemer.2023.126016.
22. 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.

Информация об авторах

Назгуль Адильхановна Медешова, младший научный сотрудник Института геологических наук имени К.И. Сатбаева, научный сотрудник кафедры гидрогеологии, инженерной и нефтегазовой геологии Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22. n.medesheva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-9843-8622>

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; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1. NovikovDA@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9016-3281>

Ергали Сатышович Ауелхан, кандидат технических наук, заведующий кафедрой гидрогеологии, инженерной и нефтегазовой геологии Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Казахстан, 050013, г. Алматы, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22. Y.auyelkhan@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-7598-0088>

Анатолий Анатольевич Антоненко, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией черных и цветных металлов Института геологических наук имени К.И. Сатбаева Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22. a.antonenko@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-3025-9227>

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>

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>

Федор Федорович Дульцев, 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. DultsevFF@ipgg.sbras.ru <https://orcid.org/0000-0002-6848-5775>

Адил Муканович Орынбек, главный гидрогеолог Управления геологии АО «Волковгеология», Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 168. adil_83kz@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-9754-7412>

Шаттык Догдырхановна Минискул, научный сотрудник Института геологических наук имени К.И. Сатбаева Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22. sh.miniskul@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-8878-2008>

Анатолий Витальевич Черных, 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. ChernykhAV@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8680-420X>

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

Поступила в редакцию: 05.07.2024

Поступила после рецензирования: 29.09.2024

Принята к публикации: 07.10.2024

REFERENCES

1. Fan Y., Song H., Wang Z., Gan N., Zhang C., Zhao B., Xu Z., Tan Y. The behavior of pyrite during in-situ leaching of uranium by $\text{CO}_2 + \text{O}_2$: a case study of the Qianjiadian uranium deposit in the Songliao Basin, northeastern China. *Ore Geology Reviews*, 2024, vol. 169, article 106085. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106085
2. Ji H., Zhong J., He Z., Chen H., Li Z., Qin M., Zhu B., Wu Y., Dong Q. Jurassic sedimentary evolution model and its implication for the sandstone-type uranium mineralization in the Kamusite area in eastern Junggar Basin, NW China. *Ore Geology Reviews*, 2024, vol. 168, article 106042. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106042
3. Li Q., Xiong Z., Xiang P., Zhou L., Zhang T., Wu Q., Zhao C. Effects of uranium mining on soil bacterial communities and functions in the Qinghai-Tibet plateau. *Chemosphere*, 2024, vol. 347, article 140715. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140715
4. Zhang B., Yan T., Wang X., Qiao Y., Liu H., Zhang B. Hydrogeochemical characteristics and enrichment regularities of groundwater uranium in the Erlan Basin, China. *Applied Geochemistry*, 2024, article 106094. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106094
5. Hashemi S., Shin I., Kim S.-O., Lee W.-C., Lee S.-W., Jeong D. H., Kim M.S., Kim H., Yang Ji. Health risk assessment of uranium intake from private residential drinking groundwater facilities based on geological characteristics across the Republic of Korea. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 913, article 169252. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169252
6. Novikov D.A., Vakulenko L.G., Yan P.A., Khvashchenskaya A.A. Uranium and thorium in the water-rock system (using the example of oil and gas deposits in the northern regions of Western Siberia). *Geology and mineral resources of Siberia*, 2023, no. 3 (55), pp. 78–88. (In Russ.) DOI: 10.20403/2078-0575-2023-3-78-88
7. Verma M., Loganathan V.A. Hydrogeochemical constraints on uranium contamination of groundwater for drinking water supplies and associated health risks. *Groundwater for Sustainable Development*, 2023, vol. 23, article 100973. DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100973
8. Lavanya B.S.K., Namitha S.N., Hidayath M., Prathibha B.S., Chandrashekara M.S. Mapping of uranium in groundwater of Mysuru district, Karnataka, India and radiation dose to the population. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 2023, vol. 341, pp. 22–27. DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2023.09.011
9. Rajput U., Swami D., Joshi N. Geospatial analysis of toxic metal contamination in groundwater and associated health risks in the lower Himalayan industrial region. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 938, article 173328. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173328
10. Marteleto T. de P., Abreu A.E.S., Barbosa M.B., Yoshinaga-Pereira S., Bertolo R.A., Enzweiler J. Uranium anomaly in groundwater of the hard rock aquifer system in southeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 2024, vol. 133, article 104733. DOI: 10.1016/j.jsames.2023.104733
11. Hailu K., Kebede S., Birhanu B., Lapworth D. Tracing contaminants of emerging concern in the Awash River basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, vol. 54, article 101869. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101869
12. Bäuml R., Putschert R., Mueller P., Krekeler T., Zappala J.C., Matsumoto T., Gröger-Trampe J., Koeniger P., Vockenhuber C., Romeo N., Mabry J. New insights into the flow dynamics of a deep freshwater aquifer in the semi-arid and saline Cuvelai-Etoshia Basin, Northern Namibia: Results of a multi-environmental tracer study. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, vol. 52, article 101721. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101721
13. Zaryab A., Farahmand A., Jafari Z., Ali S., Alijani F., Nassery H.R. Geochemical evolution of spring waters in carbonate dominated aquifer in Upper Shirin Tagab sub-basin, northern Afghanistan. *Groundwater for Sustainable Development*, 2024, vol. 25, article 101102. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101102
14. 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, article 166937. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166937
15. Richard D., Rafini S., Walter J. Natural metal contents and influence of salinization in deep Canadian Shield groundwater: Base level versus mineral deposit enrichment halos. *Applied Geochemistry*, 2024, vol. 170, article 106078. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106078
16. Filter J., Schröder C., El-Athman F., Dippon-Deissler U., Houben G.J., Mahringer D. Nitrate-induced mobilization of trace elements in reduced groundwater environments. *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 927, article. 171961. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171961
17. Zholtaev G.Zh., Zhukov N.M., Antonenko A.A. *Atlas of patterns of placement of solid mineral deposits in the Republic of Kazakhstan*. Almaty, LLP "Institute of Geological Sciences named after K.I. Satpayev" Publ., 2023. 265 p. (In Russ.)

18. Petrov N.N., Yazikov V.G., Aubakirov Kh.B., Plekhanov V.N., Vershkov A.F., Lukhtin V.F. *Uranium deposits of Kazakhstan: (exogenous)*. Almaty, Gylym Publ., 1995. 264 p. (In Russ.)
19. Frolov P.M. *Hydrogeology of the USSR*. Vol. 33. Northern Kazakhstan. Moscow, Nedra Publ., 1966. 363 p. (In Russ.)
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., Khvashchevskaya 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., Derkachev 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., 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, article 100674. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100674.

Information about the authors

Nazgul A. Medeshova, Junior Researcher, Researcher, Satbayev University, 22, Satpayev street, Almaty, 050013, Kazakhstan. n.medesheva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-9843-8622>

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; Associate Professor, Novosibirsk State University, 1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. NovikovDA@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9016-3281>

Ergali S. Auelkhan, Cand. Sc., Head of the Hydrogeology, Engineering and Oil and Gas Geology Department, Satbayev University, 22, Satpayev street, Almaty, 050013, Kazakhstan. Y.auyelkhan@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-7598-0088>

Anatoly A. Antonenko, Cand. Sc., Head of the Laboratory of Ferrous and Non-ferrous Metals, Satbayev University, 22, Satpayev street, Almaty, 050013, Kazakhstan. a.antonenko@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-3025-9227>

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

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

Fedor F. Dultsev, Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. DultsevFF@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6848-5775>

Adil M. Orynbeke, Chief Hydrogeologist, Volkovgeology JSC, 168, Bogenbay batyr street, Almaty, 050012, Kazakhstan. adil_83kz@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-9754-7412>

Shattyk D. Miniskul, Researcher, Satbayev University, 22, Satpayev street, Almaty, 050013, Kazakhstan. sh.miniskul@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-8878-2008>

Anatoliy V. Chernykh, Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3/6, Koptug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. ChernykhAV@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8680-420X>

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: 05.07.2024

Revised: 29.09.2024

Accepted: 07.10.2024