ГИДРОГЕОЛОГИЯ

УДК 550.452(477)
DOI: 10.46698/VNC.2026.18.33.002

Оригинальная статья

Радионуклидный состав природных вод Крымского полуострова

Д.А. Новиков[1,2], В.В. Черных[1,2], Н.И. Яндола[1,2], Ф.Ф. Дульцев[1,2]

[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Коптюга, 3,
e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru;

[2] Севастопольский государственный университет, Россия, 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Статья поступила: 22.04.2026, доработана: 11.09.2026, принята к публикации: 16.09.2026

Резюме: в работе представлены новые сведения о концентрациях урана и тория в различных гидрогеологических структурах Крыма. **Актуальность исследований:** в условиях климатических изменений и усиливающегося антропогенного воздействия оценка состояния водных ресурсов становится важной, что особенно актуально в отношении водных ресурсов Крымского полуострова. Этот регион обладает значительным туристско-рекреационным потенциалом, в связи с чем определяется важность сохранения и рационального использования природных вод, применяемых в питьевых целях, санаторно-курортном лечении и сельском хозяйстве. **Цель исследований:** обобщение собственных данных по распределению урана и тория в разных типах природных вод Крымского полуострова. **Материал и методы исследований:** замер быстроизменяющихся параметров проб подземных вод выполнен на месте отбора; лабораторное изучение ионно-солевого и микрокомпонентного состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и другими проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. **Результаты:** воды характеризуются преимущественно HCO_3-Ca составом с величиной общей минерализации от 40 до 330519 мг/дм^3. Преобладают нейтральные и щелочные воды с вариацией значений pH от 6 до 10 (в среднем 8). Обстановки изменяются от восстановительных с Eh = -183 мВ до окислительных с Eh = +507 мВ; содержание растворенного кислорода достигает 27,7 мг/дм^3 (в среднем 6,6 мг/дм^3). Концентрации радионуклидов в природных водах Крымского полуострова изменяются в следующих диапазонах: ^{238}U от $3{,}10 \cdot 10^{-7}$ до 0,12 мг/дм^3 и ^{232}Th от $1{,}92 \cdot 10^{-7}$ до $1{,}20 \cdot 10^{-3}$ мг/дм^3, отношение ^{232}Th/^{238}U варьирует в интервале $5{,}26 \cdot 10^{-5}$–9,51.

Ключевые слова: природные воды, гидрогеохимия, уран, торий, Крымский полуостров.

Благодарности: *Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 25-43-02207 «Сравнительное исследование радиологической опасности подземных вод в прибрежной зоне Крымского полуострова и Бэйхая»*.

Для цитирования: Новиков Д.А., Черных В.В., Яндола Н.И., Дульцев Ф.Ф. Радионуклидный состав природных вод Крымского полуострова. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(3): 34–46. DOI: 10.46698/VNC.2026.18.33.002

HYDROGEOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2026.18.33.002

Original paper

Radionuclide composition of natural waters of the Crimean Peninsula

D.A. Novikov[1,2], V.V. Chernykh[1,2], N.I. Yandola[1,2], F.F. Dultsev[1,2]

[1] Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 3 Acad. Koptyug Ave., Novosibirsk 630090, Russian Federation, e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru;

[2] Sevastopol State University, 33 Universitetskaya Str., Sevastopol 299053, Russian Federation

Received: 22.04.2026, revised: 11.09.2026, accepted: 16.09.2026

Abstract: This study presents new data on uranium and thorium concentrations in various hydrogeological structures of Crimea. **Relevance of the study:** under conditions of climate change and increasing anthropogenic pressure, assessment of the state of water resources is becoming increasingly important, particularly with regard to the water resources of the Crimean Peninsula. The region has considerable tourism and recreational potential, which highlights the importance of preserving and ensuring the rational use of natural waters utilized for drinking purposes, health-resort treatment, and agriculture. **Objective:** to summarize the authors' data on the distribution of uranium and thorium in different types of natural waters of the Crimean Peninsula. **Materials and methods:** rapidly changing physicochemical parameters of groundwater samples were measured in situ at the sampling sites. Laboratory analyses of the ionic composition and trace-element content were performed using titrimetry, ion chromatography, inductively coupled plasma mass spectrometry, and other analytical methods at the Problem Research Laboratory of Hydrogeochemistry, School of Earth Sciences and Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University. **Results:** the waters are predominantly of the HCO_3–Ca type, with total dissolved solids ranging from 40 to 330,519 mg/dm³. Neutral and alkaline waters predominate, with pH values ranging from 6 to 10 (mean 8). Redox conditions vary from reducing, with Eh = –183 mV, to oxidizing, with Eh = +507 mV. Dissolved oxygen concentrations reach 27.7 mg/dm³, with a mean value of 6.6 mg/dm³. Radionuclide concentrations in the natural waters of the Crimean Peninsula vary within the following ranges: ^{238}U from 3.10×10^{-7} to 0.12 mg/dm³ and ^{232}Th from 1.92×10^{-7} to 1.20×10^{-3} mg/dm³. The $^{232}Th/^{238}U$ ratio ranges from 5.26×10^{-5} to 9.51.

Keywords: natural waters, hydrogeochemistry, uranium, thorium, Crimean Peninsula.

Acknowledgements: *The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 25-43-02207, "Comparative study of the radiological hazards of groundwater in the coastal zones of the Crimean peninsula and Beihai"*.

For citation: Novikov D.A., Chernykh V.V., Yandola N.I., Dultsev F.F. Radionuclide composition of natural waters of the Crimean Peninsula. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(3): 34–46. DOI: 10.46698/VNC.2026.18.33.002

Введение

Регламентирование содержания радионуклидов в питьевых источниках на территории РФ осуществляется согласно СанПиН 2.1.4.1074-01 (ред. от 02.04.2018), ГОСТ Р 51232-98 и ГН 2.1.5.1315-0. Данные нормативы устанавливают порог для урана (^{238}U) на уровне 0,015 мг/дм³, при этом ПДК для тория (^{232}Th) в отечественной законодательной базе не существует. Согласно экспертным оценкам НКДАР ООН (UNSCEAR), свыше 98% совокупной дозы на население формируется за счет природных радиоактивных источников. В связи с этим изучение естественной радиоактивности гидросферы оста-

ется одной из приоритетных задач глобального мониторинга. Для Крыма, обладающего уникальным потенциалом в сфере санаторно-курортного и рекреационного комплекса, рациональное недропользование имеет критически важное значение. Продление государственной программы «Социально-экономическое развитие Республики Крым и г. Севастополя» до 2030 года (Постановление Правительства РФ № 2181 от 27.12.2025 г.)подчеркивает необходимость обеспечения региона качественными водными ресурсами для нужд здравоохранения, агропромышленного сектора и питьевого обеспечения населения.

Первый систематический обзор по радиоактивности гидросферы был представлен В.И. Вернадским в фундаментальном труде «Очерки геохимии», впервые опубликованном в Париже в 1924 году. В своих исследованиях [Вернадский, 1997] ученый выделял работы таких первопроходцев в области изучения радиоактивных свойств воды, как Е.С. Бурксер, В.Г. Хлопин, А.Н. Огильви, И.А. Бергман, А.П. Соколов и др. Согласно современной классификации [Геологический словарь…, 2012], среди подземных вод с аномальным содержанием радионуклидов выделяют следующие классы: радоновые (активность Rn достигает $7{,}5 \cdot 10^5$ Бк/дм^3); радиевые (концентрация Ra варьируется от $n \cdot 10^{-11}$ до $n \cdot 10^{-9}$ г/дм^3); урановые (содержание U от $n \cdot 10^{-5}$ до $n \cdot 10^{-2}$ г/дм^3); смешанные. Примечательно, что в контексте изучения радиоактивности природных вод ториевая составляющая традиционно оставалась вне поля зрения исследователей. Со времен В.И. Вернадского доминировало убеждение, что концентрации ^{232}Th и его производных в гидросфере настолько мизерны, что находятся за пределами чувствительности методов анализа. Великий естествоиспытатель полагал, что «торий стоит вне геохимии воды» и фактически не участвует в глобальном водном цикле [Вернадский, 1997]. Однако накопленный к настоящему времени массив данных указывает на необходимость пересмотра и уточнения данного классического постулата.

Современные комплексные исследования, представленные в мировой научной периодике, акцентируют внимание на закономерностях распределения радионуклидов в источниках питьевого водоснабжения и оценке их воздействия на здоровье населения [Kochhann et al., 2013; Lytle et al., 2014; Abdurabu et al., 2016; Seddique et al., 2020]. Значительный массив публикаций сфокусирован на анализе геохимических, гидрогеологических и литологических факторов, обуславливающих миграцию естественных радионуклидов в гидрогеологических системах [Madi et al., 2014; Dzaugis et al., 2016; Guo et al., 2018; Zhao et al., 2020; Novikov et al., 2021]. Отдельный пласт научных работ посвящен проблемам техногенного радиоактивного загрязнения гидросферы и почвенного покрова в районах освоения месторождений полезных ископаемых [Ivanova et al., 2015; Desbarats et al., 2016; He et al., 2018; Yi et al., 2020].

В современной научной повестке возрастает число работ, посвященных мониторингу качества источников питьевых вод в условиях глобальной климатической повестки. Особое внимание уделяется экологической экспертизе водных систем в регионах с различной интенсивностью техногенного воздействия, вопросам водообеспечения крупных агломераций и долгосрочному прогнозированию водопотребления [Raftery et al., 2017; Sultan et al., 2025; Guo et al., 2025]. Согласно наиболее консервативным климатическим моделям, к началу XXII века неизбежен рост температуры на планете минимум на 2 °C. Данный процесс, протекающий независимо от сдерживания эмиссии парниковых газов, приведет к необратимым трансформациям биосферы. Экстремальные гидрометеорологические явления – участившиеся засухи, аномальные температурные пики и подъем уровня Мирового океана – приобретут критический характер при преодолении двухградусного порога, создавая новые вызовы для экологической безопасности [Raftery et al., 2017].

Проблема дефицита и качества водных ресурсов наиболее активно обсуждается в странах Латинской Америки, Азии и Африки, где ситуация с водообеспечением населения стоит наиболее остро, что во многом сопоставимо с существующими проблема-

ми Крымского полуострова. В последние годы значительное внимание уделяется мониторингу подземных вод в урбанизированных районах Китая, Алжира, Индии, Израиля, Камеруна, Бангладеш, Нигера, США, Словении и ряда других государств [Mahmoudi et al., 2015; Benrabah et al., 2016; Aloni, Brenner, 2017; Yepu et al., 2025; Liu et al., 2025; Li et al., 2025; Yang et al., 2025]. Комплексные вопросы организации хозяйственно-питьевого водоснабжения городских агломераций, включая риски техногенного загрязнения и истощения запасов, детально проанализированы в многочисленных региональных исследованиях зарубежных авторов [Singh et al., 2015; Foto et al., 2016; Zhang et al., 2017; Castiglioni et al., 2018; Kumar et al., 2025; Medhi et al., 2025; Thakur, 2025; Mantashloo et al., 2025].

Гидрогеологическое изучение Крымского полуострова охватывает более чем вековой период и неразрывно связано с фундаментальными трудами С.В. Альбова, В.Н. Дублянского, Н.С. Огняника, В.М. Шестопалова, М.В. Чуринова, О.Е. Фесюнова и ряда других выдающихся ученых. Современный этап развития региональной гидрогеологии представлен работами Е.П. Каюковой, Д.А. Новикова, С.В. Токарева, А.В. Лущика, А.А. Маслова, Д.Н. Горобцова, В.Н. Самарцева и других. Несмотря на значительную изученность гидродинамических и гидрохимических процессов, специфика радионуклидного состава природных вод в данных работах оставалась практически не затронутой. Существующий пробел в знаниях определяет цель настоящей статьи, которая заключается в систематизации и обобщении авторских данных о закономерностях распределения урана и тория в различных типах водных объектов Крыма.

Материал и методы исследования

Фундаментом настоящей работы послужили результаты полевых экспедиций и аналитических исследований, проведенных в период с 2018 по 2025 гг. За указанный промежуток времени было отобрано и подвергнуто детальному анализу 738 проб природных вод, характеризующихся значительным изотопно-геохимическим разнообразием – от ультрапресных типов до предельно насыщенных рассолов. Пространственное распределение точек мониторинга отражено на фрагменте карты фактического материала (рис. 1).

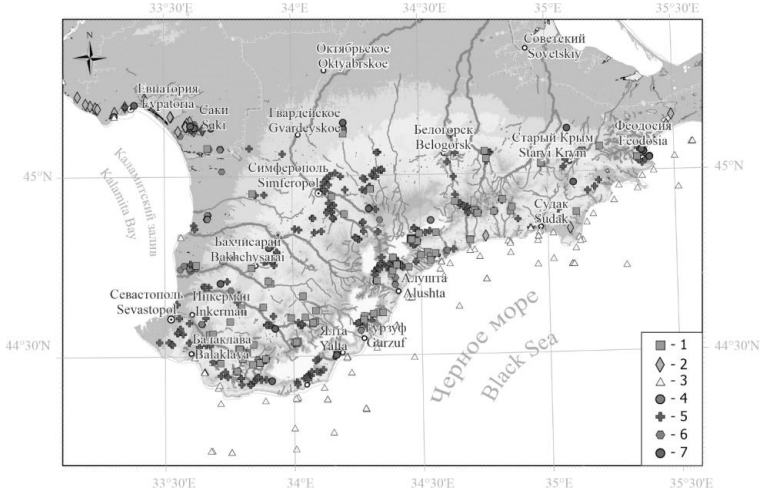

Рис. 1. Местоположение изученных природных вод Крымского полуострова
Поверхностные воды: 1 – речные и озерные (преимущественно пресные),
2 – речные и озерные (от солоноватых до рассолов), 3 – морские; подземные воды:
4 – конденсационные (пещеры), 5 – грунтовые,
6 – артезианские (преимущественно пресные), 7 – артезианские (минеральные) /

Fig. 1. Location of the studied natural waters of the Crimean Peninsula Surface waters:
1 – river and lake (mostly fresh), 2 – river and lake (from brackish to brine), 3 – marine; groundwater:
4 – condensation (caves), 5 – groundwater, 6 – artesian (mostly fresh), 7 – artesian (mineral)

На 2026 год запланировано расширение исследовательской программы в рамках гранта Российского научного фонда (№ 25-43-02207) с акцентом на изучение гидрогеологических структур юго-западного Крыма. Ранее авторским коллективом были опубликованы данные по радионуклидному составу ряда водных объектов Крымского полуострова [Новиков и др., 2021]. Морские экспедиционные работы для поиска субмаринных источников подземных вод по прибрежным районам Крыма и их детального изучения выполнялись на научно-исследовательском судне «Пионер-М». Пробы морской воды отбирались на глубинах от 12,5 до 120 м.

Определение нестабильных параметров, таких как величина pH, окислительно-восстановительный потенциал (Eh), температура, а также концентрация растворенного кислорода и гидрокарбонат-иона (HCO_3^-), осуществлялось непосредственно в полевых условиях методом титриметрии. Для этих целей применялся портативный мультипараметровый комплекс Hanna HI98195, оксиметр Hanna HI98198 и специализированная полевая гидрогеохимическая лаборатория. Детальное изучение микрокомпонентного и ионно-солевого состава проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии Томского политехнического университета. Аналитический комплекс работ включал использование методов титриметрии, ионной хроматографии, а также масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Аналитические измерения выполнены специалистами В.В. Куровской, А.С. Погуца и Э.С. Бирко.

Полученные результаты и их обсуждение

В структурно-гидрогеологическом отношении район исследований включает в себя Азово-Кубанский и Равнинно-Крымский артезианские бассейны, а также складчатую область, приуроченную к мегаантиклинорию Горного Крыма (рис. 2).

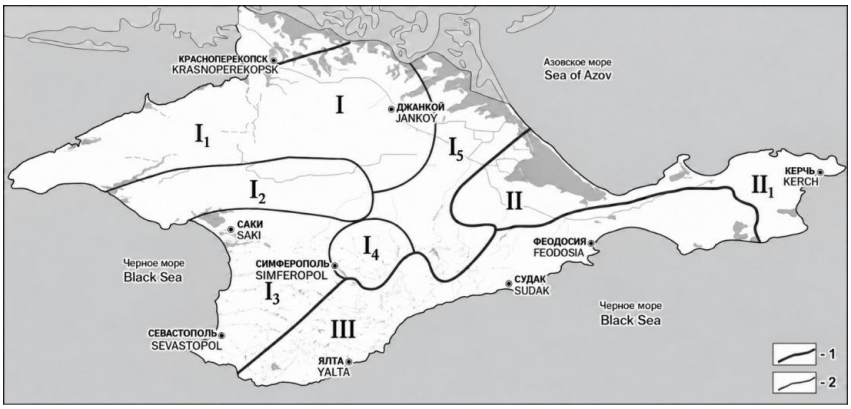

Рис. 2. Схема гидрогеологического районирования Крымского полуострова (согласно «Карта подземных вод, L-(36), (37)», 1983).

Границы: 1 – I – Равнинно-Крымский артезианский бассейн, II – Азово-Кубанский артезианский бассейн, III – Гидрогеологическая складчатая область мегаантиклинория Горного Крыма; 2 – I_1 – Северо-Сивашский артезианский бассейн, I_2 – Новоселовское поднятие, I_3 – Альминский артезианский бассейн, I_4 – Симферопольское поднятие, I_5 – Белогорский артезианский бассейн, II_1 – Керченско-Таманская система малых артезианских бассейнов /

Fig. 2. Scheme of hydrogeological zoning of the Crimean Peninsula (according to the "Map of groundwater, L-(36), (37)", 1983) Boundaries: 1 – I – Lowland-Crimean Artesian basin, II – Azov-Kuban Artesian basin, III – Hydrogeological folded area of the megaanticlinory of the Mountainous Crimea; 2 – I_1 – North Sivash Artesian basin, I_2 – Novoselov uplift, I_3 – Alminsky Artesian basin, I_4 – Simferopol uplift, I_5 – Belogorsky Artesian basin II1 is the Kerch–Taman system of small artesian basins

Большая часть территории полуострова относится к Равнинно-Крымскому артезианскому бассейну, структурными элементами которого выступают Симферопольское

и Новоселовское поднятия, а также Белогорский, Альминский и Северо-Сивашский бассейны второго порядка. Новоселовское поднятие морфологически выражено в виде приподнятого блока фундамента герцинского возраста, вмещающее напорные термальные и минеральные воды. В свою очередь, Симферопольское поднятие представляет собой антеклизу, сложенную палеоген-неогеновыми толщами; его северный сегмент выполняет роль области питания напорных горизонтов, тогда как южный сложен преимущественно слабопроницаемыми и водоупорными меловыми фациями. Северо-Сивашский бассейн, генетически связанный с одноименным прогибом, отличается замедленным водообменом: скорость миграции подземных вод снижается в 10–20 раз при движении с юга на север. При этом южная окраина бассейна служит зоной питания для неогеновых комплексов, в то время как северная, погруженная область обеспечивает транзит и формирование напоров в отложениях мела и неогена.

В западной части полуострова выделяется Альминский бассейн, локализованный в границах одноименной депрессии; его южный фланг геоморфологически совпадает с внешней и предгорной грядами Крымских гор. Северо-восточный сектор региона занимает Белогорский бассейн, генетически связанный с соответствующим прогибом. Вдоль восточного и северо-восточного побережья прослеживается Азово-Кубанский артезианский бассейн. В его структуру входит Керченско-Таманская система малых артезианских бассейнов, приуроченных к плиоцен-верхнемиоценовым толщам и содержащих высокоминерализованные воды. Складчатая область мегаантиклинория Горного Крыма охватывает южную и юго-восточную окраины полуострова – от мыса Форос до центральной части Керченского полуострова (рис. 2). Данная структура объединяет ряд тектонических элементов, включая Восточно- и Западно-Крымский синклинории, антиклинальные ядра (Туакское и Качинское), а также Агармышское поднятие, Судакско-Феодосийскую зону складчатости и юго-западное окончание мегаантиклинория.

Исследованные объекты весьма разнообразны по ионно-солевому составу и минерализации. Всю совокупность проб можно классифицировать на две основные группы: поверхностные и подземные воды. К первой группе отнесены речные, пресные и соленые озера (вплоть до крепких рассолов), а также морские акватории. Вторая группа представлена конденсационными (пещерными), грунтовыми и артезианскими (как пресными, так и минеральными) водами. С геохимической точки зрения изученные воды характеризуются преимущественно HCO_3-Ca составом (рис. 3) с величиной общей минерализации от 40 до 330519 мг/дм^3 (табл. 1). Преобладают нейтральные и щелочные воды с вариацией значений pH от 6 до 10 (в среднем 8).

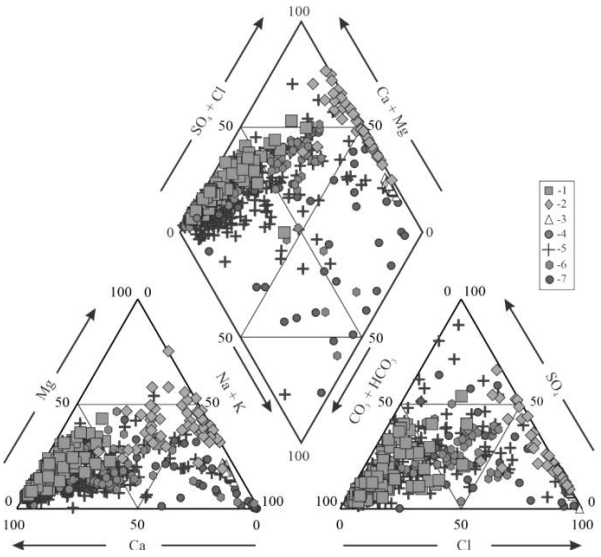

Рис. 3. Диаграмма Пайпера состава природных вод Крымского полуострова. Поверхностные воды: 1 – речные и озерные (преимущественно пресные), 2 – речные и озерные (от солоноватых до рассолов), 3 – морские; подземные воды: 4 – конденсационные (пещеры), 5 – грунтовые, 6 – артезианские (преимущественно пресные), 7 – артезианские (минеральные) /

Fig. 3. Piper diagram of the composition of the natural waters of the Crimean Peninsula. Surface waters: 1 – river and lake (mostly fresh), 2 – river and lake (from brackish to brine), 3 – marine; groundwater: 4 – condensation (caves), 5 – groundwater, 6 – artesian (mostly fresh), 7 – artesian (mineral)

Таблица 1 / Table 1

Распределение ^{238}U, ^{232}Th, $^{232}Th/^{238}U$ в природных водах Крымского полуострова / Distribution of ^{238}U, ^{232}Th, $^{232}Th/^{238}U$ in the natural waters of the Crimean Peninsula

Группа вод / Water group	M*, мг/дм^3 / TDS*, mg/dm^3	Преобладающий хим. тип / Dominant chemical type	^{238}U, мкг/дм^3 / ^{238}U, μg/dm^3	^{232}Th, мкг/дм^3 / ^{232}Th, μg/dm^3	$^{232}Th/^{238}U$
Поверхностные воды / Surface waters					
Речные и озёрные (преимущественно пресные) / River and lake (primarily freshwater)	160-1000 401 (105)	HCO_3-Ca HCO_3-Ca-Mg	0,05-40,00 0,57(105)	сл./trace-1,20 0,03(98)	сл./trace-2,26 0,06(98)
Речные и озёрные (от солоноватых до рассолов) / Lakes (from saltwater to brine)	1400-330519 148285(50)	Cl-Na HCO_3-Ca	0,47-82,13 12,24(50)	0,01-1,03 0,12(15)	сл./trace-0,52 0,11(15)
Морские / Seawater	8541-21108 17904(139)	Cl-Na	0,30-2,69 1,65(139)	сл./trace-0,24 0,06(38)	сл./trace-0,14 0,03(38)
Подземные воды / Groundwater					
Конденсационные (пещеры) / Condensation (caves)	40	HCO_3-Ca	0,03	0,006	0,23
Грунтовые / Groundwater	214-6107 707(330)	HCO_3-Ca HCO_3-Ca-Mg	0,02-120 1,99(330)	сл./trace-0,10 0,01(238)	сл./trace-0,71 0,01(238)
Артезианские (преимущественно пресные) / Artesian (primarily fresh)	359-2306 904(74)	HCO_3-Ca Cl-HCO_3-Ca-Na	сл./trace-3,06 1,11(75)	сл./trace-0,09 0,01(47)	сл./trace-0,14 0,02(47)
Артезианские (минеральные) / Artesian (mineral)	427-25411 2638(34)	HCO_3 со смешанным катионным составом / HCO_3 with mixed cationic composition	сл./trace-14,55 0,78(28)	сл./trace-0,47 0,03(27)	сл./trace-9,51 1,59(22)

Примечание: в числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее, в скобках – количество определений. M* – величина общей минерализации вод; сл. – следовые концентрации /

Note: the numerator contains the range of values, the denominator contains the average, and the number of definitions in parentheses. M* is the value of the total mineralization of waters; trace is the trace concentrations.

Значения окислительно-восстановительного потенциала Eh изменяются от восстановительных -183 мВ до окислительных +507 мВ, содержание растворенного кислорода достигает 27,7 мг/дм^3 (в среднем 6,6 мг/дм^3). Современные химико-аналитические исследования природных вод исследуемой территории выявили широкую вариацию содержаний урана, тория и отношения $^{232}Th/^{238}U$, что указывает на их неравновесное состояние в пределах изученных водоносных горизонтов (рис. 4).

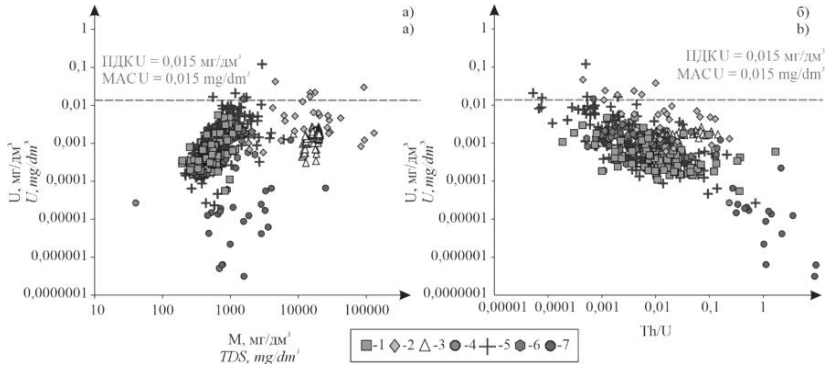

Рис. 4. Зависимость содержания урана в природных водах Крымского полуострова от величины их общей минерализации (а) и отношения Th/U (б). Поверхностные воды: 1 – речные и озерные (преимущественно пресные), 2 – речные и озерные (от солоноватых до рассолов), 3 – морские; подземные воды: 4 – конденсационные (пещеры), 5 – грунтовые, 6 – артезианские (преимущественно пресные), 7 – артезианские (минеральные) /

Fig. 4. Dependence of the uranium content in the natural waters of the Crimean Peninsula on the value of their total mineralization (a) and Th/U ratio (b). Surface waters: 1 – river and lake (mostly fresh), 2 – lake (from brackish to brine), 3 – marine; groundwater: 4 – condensation (caves), 5 – underground, 6 – artesian (mostly fresh), 7 – artesian (mineral)

Поверхностные воды, объединенные в *класс речных и озерных (преимущественно пресных)* (105 проб), характеризуются pH от 7,5 до 9,6 (среднее 8,3), преимущественно окислительной средой с Eh от +19,4 до +293,5 мВ (среднее +179 мВ) и средним содержанием $O_{2\ раств.}$ 8,0 мг/дм^3. Общая минерализация изменяется в широких пределах – от 160 до 1000 мг/дм^3 (в среднем 401 мг/дм^3). Среднее содержание кремния – 3 мг/дм^3. Состав также весьма разнообразен при доминировании гидрокарбонатного кальциевого типа. Содержание ^{238}U составляет $5{,}06\cdot10^{-5}$–0,04 мг/дм^3 (в среднем $5{,}72\cdot10^{-4}$ мг/дм^3); содержание ^{232}Th – от $1{,}92\cdot10^{-7}$ до $1{,}20\cdot10^{-3}$ мг/дм^3 (в среднем $2{,}85\cdot10^{-5}$ мг/дм^3); отношение Th/U варьирует в интервале от $2{,}04\cdot10^{-4}$ до 2,26 (среднее $6{,}21\cdot10^{-2}$).

Класс речных и озерных вод (от солоноватых до рассолов) (50 проб) объединяет воды со средним значением pH равным 8,4 (7,4–10,0), Eh равным 69 мВ (разброс от -385 до +232,5 мВ) и средним содержанием $O_{2\ раств.}$ 5,8 мг/дм^3. Уровень минерализации объектов данного класса колеблется в широком интервале – от 1,4 до 330,5 г/дм³ (при средней величине 107,7 г/дм³). Химический облик вод характеризуется большим разнообразием: доминируют воды хлоридно-натриевого типа (68%), существенную долю составляют гидрокарбонатно-кальциевые воды (27%), в то время как на сульфатно-хлоридные разновидности со смешанным катионным составом приходится около 5%. Содержание ^{232}Th изменяется в диапазоне от $1{,}43\cdot10^{-5}$ до $1{,}03\cdot10^{-3}$ мг/дм^3 (среднее значение $2{,}24\cdot10^{-4}$ мг/дм^3); содержание ^{238}U составляет от $4{,}7\cdot10^{-4}$ до $8{,}21\cdot10^{-2}$ мг/дм^3 (в среднем $1{,}22\cdot10^{-2}$ мг/дм^3); отношение Th/U варьирует в интервале от $1{,}58\cdot10^{-3}$ до 0,52 (среднее значение 0,11).

Пробы, относящиеся *к классу морских вод* (140 проб), характеризуются следующими средними значениями: Eh = +101 мВ, pH = 9, $O_{2\ раств.}$ = 7 мг/дм^3. По химическому типу воды относятся к хлоридным натриевым со средним значением минерализации 17,9 г/дм^3 (8,5–21,1 г/дм^3). Пробы этого класса отбирались на разном удалении от береговой линии и с разной глубины, которая варьировала от поверхности до 120 метров. Концентрации ^{232}Th и ^{238}U лежат в диапазонах $6{,}73\cdot10^{-6}$–$2{,}41\cdot10^{-4}$ и $3{,}03\cdot10^{-4}$–$2{,}69\cdot10^{-3}$ мг/дм^3 соответственно. Отношение Th/U варьирует в диапазоне $5{,}68\cdot10^{-3}$–0,14 (в среднем составляет $3{,}54\cdot10^{-2}$).

К подземным водам, а именно к *классу конденсационных вод*, относится одна проба, отобранная в пещере Большой Бузлук, со следующими показателями: Eh = +122,6 мВ, pH = 8,56, содержание $O_{2\ раств.}$ – 5,0 мг/дм^3. По химическому типу проба соответствует гидрокарбонатному кальциевому составу с величиной общей минерализации 40 мг/дм^3; содержание ^{232}Th и ^{238}U составляет $6{,}19\cdot10^{-6}$ и $2{,}66\cdot10^{-5}$ мг/дм^3 соответственно, а их отношение – 0,23.

Класс грунтовых вод объединяет 336 проб, характеризующихся значениями Eh от -62 до +307 мВ, pH от 6 до 9, при средних величинах +189 мВ и 8 соответственно. Среднее содержание $O_{2\ раств.}$ оценивается в 7 мг/дм^3. По составу воды этого класса относятся преимущественно к гидрокарбонатному кальциевому типу (64%). Величина общей минерализации грунтовых вод изменяется от 214 мг/дм^3 до 6,1 г/дм^3 (среднее значение 707 мг/дм^3). Вариация содержаний ^{232}Th составляет $4{,}01\cdot10^{-7}$–$1{,}04\cdot10^{-4}$ мг/дм^3, а ^{238}U $2{,}30\cdot10^{-5}$–0,12 мг/дм^3; отношение Th/U изменяется от $5{,}26\cdot10^{-5}$ до 0,71 (среднее $1{,}57\cdot10^{-2}$).

Для класса пресных артезианских вод (75 проб) характерны следующие значения показателей: Eh от -178 до +297 мВ, pH от 7 до 9, среднее содержание $O_{2\ раств.}$ – 5,2 мг/дм^3. В этой группе доминирующее положение занимают гидрокарбонатно-кальциевые воды (24% выборки), а также смешанные типы: хлоридно-гидрокарбонатные и хлоридно-сульфатные кальциево-натриевого состава, на долю которых приходится по 11%. Величина общей минерализации составляет от 359 до 2306 мг/дм^3, среднее значение – 904 мг/дм^3. Содержание ^{232}Th и ^{238}U изменяется в пределах $2{,}04\cdot10^{-7}$–$9{,}95\cdot10^{-5}$ и $5{,}04\cdot10^{-7}$–$3{,}06\cdot10^{-3}$ мг/дм^3 соответственно; среднее значение их отношения равно $1{,}75\cdot10^{-2}$ (интервал $5{,}20\cdot10^{-4}$–0,14).

Воды, объединенные в *класс артезианских (минеральных)* (34 пробы), характеризуются pH от 7 до 10 (в среднем 8,0), Eh от -351,0 до +149 мВ (в среднем -103,0) и средним содержанием $O_{2\ раств.}$ 3,0 мг/дм^3. Величина общей минерализации изменяется в широком диапазоне от 426 мг/дм^3 до 25,4 г/дм^3 (в среднем 2638 мг/дм^3). Химический состав вод разнообразен, однако доминирует гидрокарбонатный тип со смешанным катионным составом (50%). Содержание ^{238}U составляет $3{,}10\cdot10^{-7}$–$1{,}46\cdot10^{-2}$ мг/дм^3 (в среднем $7{,}8\cdot10^{-4}$); содержание ^{232}Th – $7{,}06\cdot10^{-7}$–$4{,}69\cdot10^{-4}$ мг/дм^3 (в среднем $3{,}56\cdot10^{-5}$); отношение Th/U варьирует в интервале $7{,}00\cdot10^{-4}$–9,51 (в среднем составляет 1,59). Значения отношения Th/U более единицы связаны с интенсивной миграционной способностью Th в бескислородной среде при повышенных температурах и высокой гидрогеологической закрытости недр.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований региональных гидрогеохимических исследований. Установлено, что природные воды в основном имеют HCO_3-Ca состав, с величиной общей минерализации от 40,5 до 330519 мг/дм^3. Преобладают нейтральные и щелочные воды с вариацией значений pH от 6 до 10 (в среднем 8). Значения окислительно-восстановительного потенциала Eh изменяются от восстановительных -183 мВ до окислительных +507 мВ, содержание растворенного кислорода достигает 27,7 мг/дм^3 (в среднем 6,6 мг/дм^3).

2. Концентрации урана (^{238}U) изменяются в широком диапазоне – от $3{,}10\cdot10^{-7}$ до 0,12 мг/дм^3, тория (^{232}Th) – от $1{,}92\cdot10^{-7}$ до $1{,}20\cdot10^{-3}$ мг/дм^3. Отношение ^{232}Th/^{238}U составляет $5{,}26\cdot10^{-5}$–9,51. Природа радиоактивности большинства изученных вод связана с ураном. В наибольшей степени обогащены ураном воды соленых озер и нескольких родников, где его содержание составляет 0,015–0,12 мг/дм^3, при среднем значении 0,032 мг/дм^3.

3. Результаты выполненных исследований будут использованы при оценке радиологической опасности природных вод Крымского полуострова при создании необходимой туристической инфраструктуры.

Литература

1. Вернадский В.И. Труды по радиогеологии. – М.: Наука, 1997. – 319 с.

2. Геологический словарь: в 3 т. / гл. ред. О.В. Петров. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. – Т. 3: Р–Я. – 440 с.

3. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Пыряев А.Н., Хващевская А.А., Ничкова Л.А., Сигора Г.А., Яхин Т.А. Новые изотопно-гидрогеохимические данные по составу природных вод Байдарской долины (крымский полуостров) // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. № 12. – С. 1705–1726.

4. Abdurabu W.A., Saleh M.A., Ramli A.T., Heryansyah A. Occurrence of natural radioactivity and corresponding health risk in groundwater with an elevated radiation background in Juban District, Yemen // Environmental Earth Sciences. – 2016. – Vol. 75. – 1360. DOI: 10.1007/s12665-016-6142-z.

5. Aloni A., Brenner A. Use of Cotton as a Carbon Source for Denitrification in Biofilters for Groundwater Remediation // Water. – 2017. – Vol. 9. – pp. 714–725. DOI: 10.3390/w9090714.

6. Benrabah S., Attoui B., Hannouche M. Characterization of groundwater quality destined for drinking water supply of Khenchela City (eastern Algeria) // Journal of Water and Land Development. – 2016. – Vol. 30. – pp. 13–20. DOI: 10.1515/JWLD-2016-0016.

7. Castiglioni S., Davoli E., Riva F., Palmiotto M., Camporini P., Manenti A., Zuccato E. Mass balance of emerging contaminants in the water cycle of a highly urbanized and industrialized area of Italy // Water Research. – 2018. – Vol. 131. – pp. 287–298. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.047.

8. Desbarats A.J., Percival J.B., Venance K.E. Trace element mobility in mine waters from granitic pegmatite U–Th–REE deposits, Bancroft area, Ontario // Applied Geochemistry. – 2016. – Vol. 67. – pp. 153–167. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2016.02.010.

9. Dzaugis M.E., Spivack A.J., Dunlea A.G., Murray R.W., D'Hondt S. Radiolytic Hydrogen Production in the Subseafloor Basaltic Aquifer // Frontiers in Microbiology. – 2016. – Vol. 7. – 76. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00076.

10. Foto E., Ouoko Delombaut F.C.S., Djebebe Ndjiguim C.L., Songuele Bomagayen J., Poumaye N., Mabingui J. Sanitary mapping of well waters in the commune of Bimbo in the Central African Republic (CAR) // Field Actions Science Reports. – 2016. – Vol. 9. – pp. 1–21.

11. Guo J., Cao W., Li X., Ren Y., Lu C., Wang Y., Song L., Liu Y., Sun X. Comparative study on genesis mechanism of high arsenic groundwater in typical alluvial plain of the Upper and lower Yellow River, China // Science of the Total Environment. – 2025. – Vol. 957. – 177694. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177694.

12. Guo H., Zhao W., Li H., Xiu W., Shen J. High radionuclides in groundwater of an inland basin from Northwest China: Origin and fate // ACS Earth and Space Chemistry. – 2018. – Vol. 25. – 33. DOI: 10.1021/acsearthspacechem.8b00108.

13. He L., Gao B., Luo X., Jiao J., Qin H., Zhang C., Dong Y. Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water near a Uranium Tailing Pond in Jiangxi Province, South China // Sustainability. – 2018. – Vol. 10. – 1113. DOI: 10.3390/su10041113.

14. Ivanova K., Stojanovska Z., Badulin V., Kunovska B., Yovcheva M. Radiological impact of surface water and sediment near uranium mining sites // Journal of Radiological Protection. – 2015. – Vol. 35. – pp. 819–834. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/819.

15. Kochhann D., Behr E.R., Chaves A., Mesko M.F., Dressler V.L., Flores E.M.M., Baldisserotto B. Environmental quality evaluation of the Vacacai River, Rio Grande do Sul, Brazil // Environmental Earth Sciences. – 2013. – Vol. 70. – pp. 1727–1733. –DOI: 10.1007/s12665-013-2260-z.

16. Kumar P., Khan P.K., Kumar A. Health risk assessment upon exposure to groundwater arsenic among individuals of different sex and age groups of Vaishali district, Bihar (India) // Toxicology Reports. – 2025. – Vol. 14. – 102024. DOI: 10.1016/j.toxrep.2025.102024.

17. Li Y., Xiao L., Zeng X.C. Hydrogen gas oxidation-driven reductive mobilization of arsenic in solid phase contributing to arsenite contamination in groundwater: Insights from metagenomic and microcosm analyses // Journal of Hazardous Materials. – 2025. – Vol. 488. – 137444. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.137444.

18. Liu X., Yue F.J., Wong W.W., Lin S.C., Guo T.L., Li S.L. Arsenic toxicity exacerbates China's groundwater and health crisis // Environment International. – 2025. – Vol. 198. – 109435. DOI: 10.1016/j.envint.2025.109435.

19. Lytle D.A., Sorg T., Wang L., Chen A. The accumulation of radioactive contaminants in drinking water distribution systems // Water Research. – 2014. – Vol. 50. – pp. 396–407. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.050.

20. Madi K., Nyabeze P., Gwavava O., Sekiba M., Zhao B. Uranium, thorium and potassium occurrences in the vicinity of hot springs in the northern neotectonic belt in the Eastern Cape Province, South Africa // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2014. – Vol. 301. – pp. 351–363. DOI: 10.1007/s10967-014-3183-1.

21. Mahmoudi N., Nakhaei M., Porhemmat J. Assessment of hydrogeochemistry and contamination of Varamin deep aquifer, Tehran Province, Iran // Environmental Earth Sciences. – 2015. – Vol. 76. – 370. DOI: 10.1007/s12665-017-6698-2.

22. Mantashloo A., Shokoohi R., Torkshavand Z., Chavoshi E., Khazaei S., Khazaei M., Shabanloo A. Monte Carlo simulation for human health risk assessment of groundwater contaminated with arsenic at an Iranian semi-arid region // Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management. – 2025. – Vol. 23. – 101069. DOI: 10.1016/j.enmm.2025.101069.

23. Medhi S., Choudhury R. Spatial and temporal distribution of arsenic in groundwater of the Brahmaputra River floodplains in Assam, India // Groundwater for Sustainable Development. – 2025. – Vol. 28. – 101400. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101400.

24. 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. – Vol. 15. – pp. 100674. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100674.

25. Raftery A.E., Zimmer A., Frierson D.M.V., Startz R., Liu P. Less than 2 °C warming by 2100 unlikely // Nature Climate Change. – 2017. – Vol. 7. – pp. 637–641. DOI: 10.1038/nclimate3352.

26. Seddique A.A., Kon Y., Anma R., Masuda H., Bhattacharya P., Yokoo Y., Basak S.B., Shinoda K. Sources of U and Th in groundwater of the paleobeach aquifer at Cox's Bazar, Southeast Bangladesh // Groundwater for Sustainable Development. – 2020. – Vol. 10. – 100332. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100332.

27. Singh A., Srivastav S.K., Kumar S., Chakrapani G.J. A modified – DRASTIC model (DRASTICA) for assessment of groundwater vulnerability to pollution in an urbanized environment in Lucknow, India // Environmental Earth Sciences. – 2015. – Vol. 74. – pp. 5475–5490. DOI: 10.1007/s12665-015-4558-5.

28. Sultan M.W., Qureshi F., Ahmed S., Kamyab H., Rajendran S., Ibrahim H., Yusuf M. A comprehensive review on arsenic contamination in groundwater: Sources, detection, mitigation strategies and cost analysis // Environmental Research. – 2025. – Vol. 265. – 120457. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120457.

29. Thakur B.K. Welfare estimation of groundwater arsenic contamination in India: Insights for water policy // Journal of Cleaner Production. – 2025. – Vol. 497. – 145107. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145107.

30. Yang C., Xu Y., Yu T., Li Y., Zeng X.C. Microbial reductive mobilization of As(V) in solid phase coupled with the oxidation of sulfur compounds: An overlooked biogeochemical reaction affecting the formation of arsenic-contaminated groundwater // Journal of Hazardous Materials. – 2025. – Vol. 492. – 138234. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.138234.

31. Yepu L., Guobing W., Tao J., Ying Y., Hongyan G. Enhanced sustainable remediation of co-contaminated soil and groundwater with lead and arsenic utilizing the willow-vetiver-permeable reactive barrier system // Science of the Total Environment. – 2025. – Vol. 977. – 179343. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179343.

32. Yi L., Gao B., Liu H., Zhang Y., Du C., Li Y. Characteristics and Assessment of Toxic Metal Contamination in Surface Water and Sediments Near a Uranium Mining Area // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020. – Vol. 17. – 548. DOI: 10.3390/ijerph17020548.

33. Zhang Y., Li H., Xiao K., Wang Xuejing, Lu X., Zhang M., An A., Qu W., Wan L., Zheng C., Wang Xusheng, Jiang X. Improving Estimation of Submarine Groundwater Discharge Using Radium and Radon Tracers: Application in Jiaozhou Bay, China // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2017. – Vol. 122. – pp. 8263–8277. DOI: 10.1002/2017JC013237.

34. Zhao C., Zhang P., Li X., Ning Y., Tan L., Edwards R.L., Yao X., Cheng H. Distribution Characteristics and Influencing Factors of Uranium Isotopes in Saline Lake Waters in the Northeast of Qaidam Basin // Minerals. – 2020. – Vol. 10. – 74. DOI: 10.3390/min10010074.

References

1. Vernadsky V.I. Works on Radiogeology. Moscow. Nauka. 1997. 319 p. (In Russ.)

2. Geological Dictionary: in 3 Volumes. Ed. O.V. Petrov. 3rd ed., revised and enlarged. Saint Petersburg. VSEGEI. 2012. Vol. 3. R–Ya. 440 p. (In Russ.)

3. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Pyryaev A.N., Khvashchevskaya A.A., Nichkova L.A., Sigora G.A., Yakhin T.A. New data on hydrogeochemical and isotopic composition of natural waters of the Baidar valley (crimean Peninsula). Russian Geology and Geophysics. 2021. Vol. 62. No. 12. pp. 1705–1726. (In Russ.)

4. Abdurabu W.A., Saleh M.A., Ramli A.T., Heryansyah A. Occurrence of natural radioactivity and corresponding health risk in groundwater with an elevated radiation background in Juban District, Yemen. Environmental Earth Sciences. 2016. Vol. 75. 1360. DOI: 10.1007/s12665-016-6142-z.

5. Aloni A., Brenner A. Use of Cotton as a Carbon Source for Denitrification in Biofilters for Groundwater Remediation. Water. 2017. Vol. 9. pp. 714–725. DOI: 10.3390/w9090714.

6. Benrabah S., Attoui B., Hannouche M. Characterization of groundwater quality destined for drinking water supply of Khenchela City (eastern Algeria). Journal of Water and Land Development. 2016. Vol. 30. pp. 13–20. DOI: 10.1515/JWLD-2016-0016.

7. Castiglioni S., Davoli E., Riva F., Palmiotto M., Camporini P., Manenti A., Zuccato E. Mass balance of emerging contaminants in the water cycle of a highly urbanized and industrialized area of Italy. Water Research. 2018. Vol. 131. pp. 287–298. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.047.

8. Desbarats A.J., Percival J.B., Venance K.E. Trace element mobility in mine waters from granitic pegmatite U–Th–REE deposits, Bancroft area, Ontario. Applied Geochemistry. 2016. Vol. 67. pp. 153–167. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2016.02.010.

9. Dzaugis M.E., Spivack A.J., Dunlea A.G., Murray R.W., D'Hondt S. Radiolytic Hydrogen Production in the Subseafloor Basaltic Aquifer. Frontiers in Microbiology. 2016. Vol. 7. 76. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00076.

10. Foto E., Ouoko Delombaut F.C.S., Djebebe Ndjiguim C.L., Songuele Bomagayen J., Poumaye N., Mabingui J. Sanitary mapping of well waters in the commune of Bimbo in the Central African Republic (CAR). Field Actions Science Reports. 2016. Vol. 9. pp. 1–21.

11. Guo J., Cao W., Li X., Ren Y., Lu C., Wang Y., Song L., Liu Y., Sun X. Comparative study on genesis mechanism of high arsenic groundwater in typical alluvial plain of the Upper and lower Yellow River, China. Science of the Total Environment. 2025. Vol. 957. 177694. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177694.

12. Guo H., Zhao W., Li H., Xiu W., Shen J. High radionuclides in groundwater of an inland basin from Northwest China: Origin and fate. ACS Earth and Space Chemistry. 2018. Vol. 25. 33. – DOI: 10.1021/acsearthspacechem.8b00108.

13. He L., Gao B., Luo X., Jiao J., Qin H., Zhang C., Dong Y. Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water near a Uranium Tailing Pond in Jiangxi Province, South China. Sustainability. 2018. Vol. 10. 1113. DOI: 10.3390/su10041113.

14. Ivanova K., Stojanovska Z., Badulin V., Kunovska B., Yovcheva M. Radiological impact of surface water and sediment near uranium mining sites. Journal of Radiological Protection. 2015. Vol. 35. pp. 819–834. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/819.

15. Kochhann D., Behr E.R., Chaves A., Mesko M.F., Dressler V.L., Flores E.M.M., Baldisserotto B. Environmental quality evaluation of the Vacacai River, Rio Grande do Sul, Brazil. Environmental Earth Sciences. 2013. Vol. 70. pp. 1727–1733. DOI: 10.1007/s12665-013-2260-z.

16. Kumar P., Khan P.K., Kumar A. Health risk assessment upon exposure to groundwater arsenic among individuals of different sex and age groups of Vaishali district, Bihar (India). Toxicology Reports. 2025. Vol. 14. 102024. DOI: 10.1016/j.toxrep.2025.102024.

17. Li Y., Xiao L., Zeng X.C. Hydrogen gas oxidation-driven reductive mobilization of arsenic in solid phase contributing to arsenite contamination in groundwater: Insights from metagenomic and microcosm analyses. Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 488. 137444. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.137444.

18. Liu X., Yue F.J., Wong W.W., Lin S.C., Guo T.L., Li S.L. Arsenic toxicity exacerbates China's groundwater and health crisis. Environment International. 2025. Vol. 198. 109435. DOI: 10.1016/j.envint.2025.109435.

19. Lytle D.A., Sorg T., Wang L., Chen A. The accumulation of radioactive contaminants in drinking water distribution systems. Water Research. 2014. Vol. 50. pp. 396–407. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.050.

20. Madi K., Nyabeze P., Gwavava O., Sekiba M., Zhao B. Uranium, thorium and potassium occurrences in the vicinity of hot springs in the northern neotectonic belt in the Eastern Cape Province, South Africa. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2014. Vol. 301. pp. 351–363. DOI: 10.1007/s10967-014-3183-1.

21. Mahmoudi N., Nakhaei M., Porhemmat J. Assessment of hydrogeochemistry and contamination of Varamin deep aquifer, Tehran Province, Iran. Environmental Earth Sciences. 2015. Vol. 76. 370. DOI: 10.1007/s12665-017-6698-2.

22. Mantashloo A., Shokoohi R., Torkshavand Z., Chavoshi E., Khazaei S., Khazaei M., Shabanloo A. Monte Carlo simulation for human health risk assessment of groundwater contaminated with arsenic at an Iranian semi-arid region. Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management. 2025. Vol. 23. 101069. DOI: 10.1016/j.enmm.2025.101069.

23. Medhi S., Choudhury R. Spatial and temporal distribution of arsenic in groundwater of the Brahmaputra River floodplains in Assam, India. Groundwater for Sustainable Development. 2025. Vol. 28. 101400. DOI: 10.1016/j.gsd.2024.101400.

24. 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. Vol. 15. pp. 100674. DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100674.

25. Raftery A.E., Zimmer A., Frierson D.M.V., Startz R., Liu P. Less than 2 °C warming by 2100 unlikely. Nature Climate Change. 2017. Vol. 7. pp. 637–641. DOI: 10.1038/nclimate3352.

26. Seddique A.A., Kon Y., Anma R., Masuda H., Bhattacharya P., Yokoo Y., Basak S.B., Shinoda K. Sources of U and Th in groundwater of the paleobeach aquifer at Cox's Bazar, Southeast Bangladesh. Groundwater for Sustainable Development. 2020. Vol. 10. 100332. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100332.

27. Singh A., Srivastav S.K., Kumar S., Chakrapani G.J. A modified – DRASTIC model (DRASTICA) for assessment of groundwater vulnerability to pollution in an urbanized environment in Lucknow, India. Environmental Earth Sciences. 2015. Vol. 74. pp. 5475–5490. DOI: 10.1007/s12665-015-4558-5.

28. Sultan M.W., Qureshi F., Ahmed S., Kamyab H., Rajendran S., Ibrahim H., Yusuf M. A comprehensive review on arsenic contamination in groundwater: Sources, detection, mitigation strategies and cost analysis. Environmental Research. 2025. Vol. 265. 120457. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120457.

29. Thakur B.K. Welfare estimation of groundwater arsenic contamination in India: Insights for water policy. Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 497. 145107. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.145107.

30. Yang C., Xu Y., Yu T., Li Y., Zeng X.C. Microbial reductive mobilization of As(V) in solid phase coupled with the oxidation of sulfur compounds: An overlooked biogeochemical reaction affecting the formation of arsenic-contaminated groundwater. Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 492. 138234. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.138234.

31. Yepu L., Guobing W., Tao J., Ying Y., Hongyan G. Enhanced sustainable remediation of co-contaminated soil and groundwater with lead and arsenic utilizing the willow-vetiver-permeable reactive barrier system. Science of the Total Environment. 2025. Vol. 977. 179343. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179343.

32. Yi L., Gao B., Liu H., Zhang Y., Du C., Li Y. Characteristics and Assessment of Toxic Metal Contamination in Surface Water and Sediments Near a Uranium Mining Area. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17. 548. DOI: 10.3390/ijerph17020548.

33. Zhang Y., Li H., Xiao K., Wang Xuejing, Lu X., Zhang M., An A., Qu W., Wan L., Zheng C., Wang Xusheng, Jiang X. Improving Estimation of Submarine Groundwater Discharge Using Radium and Radon Tracers: Application in Jiaozhou Bay, China. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2017. Vol. 122. pp. 8263–8277. DOI: 10.1002/2017JC013237.

34. Zhao C., Zhang P., Li X., Ning Y., Tan L., Edwards R.L., Yao X., Cheng H. Distribution Characteristics and Influencing Factors of Uranium Isotopes in Saline Lake Waters in the Northeast of Qaidam Basin. Minerals. 2020. Vol. 10. 74. DOI: 10.3390/min10010074.