

Статья поступила в редакцию: 01.05.2026

Статья принята к публикации: 23.06.2026

Статья опубликована: 28.07.2026

УДК 550.42:546.44

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УДЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ РАДИЯ И РАДОНА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ КЫЗЫЛКУМСКОГО РЕГИОНА

Тогаев Байрамали

докторант

*Самаркандского государственного университета,
Республики Узбекистан, г. Самарканд*

Кувватова Мохинур Асадилло кизи

самостоятельный исследователь

*Навоийского горно-технологического университета,
Республики Узбекистан, г. Навои
E-mail: ulugbekabdiraxmonov@gmail.com*

Аллаберганова Гулчехра Машариповна

доцент кафедры «Общей физики»

*Навоийского горно-технологического университета,
Республики Узбекистан, г. Навои*

Музафаров Амрулло Мустафоевич

профессор кафедры «Общей физики»

*Навоийского горно-технологического университета,
Республики Узбекистан, г. Навои*

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SPECIFIC ACTIVITY OF RADIUM AND RADON IN GROUNDWATER OF THE KYZYL KUM REGION

Togaev Bayramali

Doctoral candidate,

*Samarkand State University,
Republic of Uzbekistan, Samarkand*

Kuvvatova Mohinur Asadillo qizi

Independent researcher,

*Navoi Mining and Technology University,
Republic of Uzbekistan, Navoi*

Allaberganova Gulchekhra Masharipovna

Associate Professor,

*Department of General Physics,
Navoi Mining and Technology University,
Republic of Uzbekistan, Navoi*

Muzafarov Amrullo Mustafievich*Professor,
Department of General Physics,
Navoi Mining and Technology University,
Republic of Uzbekistan, Navoi***Аннотация**

Цель исследования — сравнительный анализ удельной активности радия-226 (^{226}Ra) и радона-222 (^{222}Rn) в подземных водах Кызылкумского региона (Узбекистан), являющегося ураноносной территорией, для оценки соответствия воды нормативным требованиям и радиационной безопасности населения.

Методология. Отбор проб проведён в апреле 2025 г. из 10 водозаборных скважин, используемых населением для питьевого водоснабжения. Пробы отбирали в герметичные стеклянные контейнеры объёмом 1 л с минимизацией аэрации и транспортировали в лабораторию в течение 4–6 часов. Измерения ^{222}Rn выполнены радиометром «Альфарад Плюс» (погрешность $\pm 15\%$), ^{226}Ra — измерительным комплексом «Камера-01» (погрешность $\pm 12\%$). Каждую пробу измеряли трижды, результаты представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение. Статистическая обработка выполнена в MS Excel с расчётом коэффициента корреляции Пирсона между активностями ^{222}Rn и ^{226}Ra .

Результаты. Установлено, что в 9 из 10 проб удельная объёмная активность ^{222}Rn превышает уровень вмешательства (60 Бк/л) в 3,0–13,3 раза, достигая 800 Бк/л. Активность ^{226}Ra превышает норматив (0,2 Бк/л) в 1,5–2,9 раза, максимальное значение 0,58 Бк/л. Вклад ^{222}Rn в годовую эффективную дозу составляет 98,3–99,8 %. Выявлена сильная положительная корреляция между активностями ^{222}Rn и ^{226}Ra ($r = 0,89$, $p < 0,01$), что указывает на общий геохимический источник.

Выводы. Вода из 9 из 10 исследованных скважин не соответствует радиационным нормативам и не рекомендуется для питьевого использования без предварительной обработки (аэрация, фильтрация). Полученные результаты обосновывают необходимость сезонного мониторинга (4 раза в год) и углублённых гидрогеологических исследований для выявления факторов, контролирующих миграцию радионуклидов.

Abstract

Objective — comparative analysis of the specific activity of radium-226 (^{226}Ra) and radon-222 (^{222}Rn) in groundwater of the Kyzylkum region (Uzbekistan), a uranium-bearing territory, to assess compliance with regulatory requirements and radiation safety.

Methodology. Sampling was conducted in April 2025 from 10 water supply wells used by the population for drinking purposes. Samples were collected in airtight 1 L glass containers with minimal aeration and transported to the laboratory within 4–6 hours. Measurements of ^{222}Rn were performed using an "Alfarad Plus" radiometer (uncertainty $\pm 15\%$), and ^{226}Ra using a "Kamera-01" measuring complex (uncertainty $\pm 12\%$). Each sample was measured in triplicate; results are presented as mean $\pm$ standard deviation. Statistical analysis was performed using MS Excel with Pearson correlation coefficient calculation between ^{222}Rn and ^{226}Ra activities.

Results. In 9 out of 10 samples, ^{222}Rn specific activity exceeded the intervention level (60 Bq/L) by a factor of 3.0–13.3, reaching 800 Bq/L. ^{226}Ra activity exceeded the regulatory limit (0.2 Bq/L) by 1.5–2.9 times, with a maximum of 0.58 Bq/L. The contribution of ^{222}Rn to the annual effective dose

ranges from 98.3 to 99.8 %. A strong positive correlation between ^{222}Rn and ^{226}Ra activities was found ($r = 0.89$, $p < 0.01$), indicating a common geochemical source.

Conclusions. Water from 9 out of 10 investigated wells does not meet radiation safety standards and is not recommended for drinking purposes without pre-treatment (aeration, filtration). The results justify the need for seasonal monitoring (4 times per year) and further hydrogeological studies to identify factors controlling radionuclide migration.

Ключевые слова: цепочки распада урана, подземные воды, удельная активность, радий-226, радон-222, Кызылкумский регион, уровень вмешательства, радиационная безопасность.

Keywords: uranium decay chains, groundwater, specific activity, radium-226, radon-222, Kyzylkum region, intervention level, radiation safety.

Введение

Кызылкумский регион является ураноносной территорией, где на обширных площадях локализованы урановые залежи. Водозаборные скважины в этих районах — основной источник водоснабжения населения. Однако вода из таких источников может содержать значительные концентрации радионуклидов уранового ряда [1–7].

На сегодняшний день в открытой печати имеется ограниченное количество данных о радионуклидном составе подземных вод Кызылкумского региона и их соответствии санитарно-гигиеническим и радиационным нормам [8–11]. Определение удельной активности ^{226}Ra и ^{222}Rn в подземных водах является актуальной задачей радиоэкологии, геохимии и ядерной физики [12–19].

Цель исследования — сравнительный анализ значений удельной активности ^{226}Ra и ^{222}Rn в подземных водах Кызылкумского региона с оценкой их соответствия нормативным уровням.

Материалы и методы

Объект исследования. Объектом являлись подземные воды из 10 водозаборных скважин, расположенных на территории Навоийской области (Кызылкумский регион, Узбекистан): г. Навои, г. Зарафшан, г. Учкудук, пос. Зафарabad, пос. Кетменчи, пос. Нуробод, пос. Нурбулок, пос. Мусаккок, районная больница, скважина №9. Выбор скважин обусловлен их использованием населением для питьевого водоснабжения и территориальной привязкой к ураноносным участкам.

Отбор, консервация и транспортировка проб. Отбор проб проведён в апреле 2025 г. (весенний сезон). Для каждой скважины отобрано по 3 параллельные пробы ($n=3$) объёмом 1 л в герметичные стеклянные контейнеры с притёртыми пробками. Отбор выполняли с минимальной аэрацией для предотвращения дегазации радона. Пробы транспортировали в лабораторию в течение 4–6 часов при температуре 4–6 °C. Время от отбора до начала измерений не превышало 8 часов.

Измерительное оборудование и методики. Определение удельной объёмной активности ^{222}Rn выполнено с использованием радиометра «Альфарад Плюс» (ООО «НТЦ Амплитуда», Россия) методом альфа-спектрометрии с пробоподготовкой путём дегазации и накопления на

фильтре. Диапазон измерений: $10\text{--}10^5$ Бк/л, относительная погрешность: $\pm 15\%$ при доверительной вероятности 0,95.

Определение удельной активности ^{226}Ra выполнено с использованием измерительного комплекса «Камера-01» (ООО «НТЦ Амплитуда», Россия) с применением эманационного метода: выделение радона из пробы, его накопление в камере и регистрация альфа-излучения. Диапазон измерений: 0,01–10 Бк/л, относительная погрешность: $\pm 12\%$ при доверительной вероятности 0,95.

Статистическая обработка. Каждую пробу измеряли трижды ($n=3$). Результаты представлены как среднее арифметическое $\pm$ стандартное отклонение ($M \pm \sigma$). Статистическую обработку выполняли в MS Excel. Для оценки связи между активностями ^{222}Rn и ^{226}Ra рассчитан коэффициент корреляции Пирсона (r). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Для каждой точки отбора рассчитаны кратности превышения норматива.

Результаты и обсуждение

Среди исследуемых радионуклидов ^{226}Ra и ^{222}Rn наибольший вклад в годовую эффективную дозу облучения вносит ^{222}Rn — его доля составляет от 98,3 до 99,8 %. В связи с этим приоритетной является оценка пригодности подземных вод по удельной объемной активности ^{222}Rn .

В 9 из 10 проб зафиксировано превышение уровня вмешательства по ^{222}Rn (60 Бк/л). Значения удельной объемной активности варьировали от 25 до 800 Бк/л. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты определения удельной активности ^{222}Rn и ^{226}Ra в подземных водах (апрель 2025 г., $n=3$, $M \pm \sigma$).

Точка отбора	^{222}Rn , Бк/л	^{226}Ra , Бк/л	Кратность превышения (^{222}Rn)	Кратность превышения (^{226}Ra)
Навои	25 ± 4	$0,18 \pm 0,02$	0,42	≈ 1
Зафарабад	240 ± 36	$0,38 \pm 0,05$	4,00	1,9
Зарафшан	220 ± 33	$0,32 \pm 0,04$	3,67	1,6
Учкудук	160 ± 24	$0,34 \pm 0,04$	2,72	1,7
Кетменчи	120 ± 18	$0,30 \pm 0,04$	2,00	1,5
Нуробод	800 ± 120	$0,58 \pm 0,07$	13,33	2,9
Нурбулок	650 ± 98	$0,52 \pm 0,06$	10,83	2,6
Мусакок	520 ± 78	$0,46 \pm 0,06$	8,85	2,3
Районная больница	670 ± 101	$0,54 \pm 0,06$	11,17	2,7
Скв. №9	720 ± 108	$0,56 \pm 0,07$	12,19	2,8
Норматив	60	0,20	—	—

Как видно из результатов, приведенных в таблице 1, значение удельной объемной активности - ^{222}Rn и ^{226}Ra в 9 пробах из 10 превышает уровня вмешательств. А отличается от нормы в диапазоне от 3,0 до 13,33 раза для ^{222}Rn и отличается от нормы в диапазоне от 1,5 до 2,9 раза для ^{226}Ra .

В рамках исследования были проанализированы пробы подземных вод, отобранные из 10 скважин. В 9 пробах из 10 проб зафиксировано превышение уровня вмешательства по ^{222}Rn и значения удельной объёмной активности варьировали в диапазоне от 25 Бк/л до 800 Бк/л.

На основании полученных результатов построена гистограмма, отражающая изменение удельной объёмной активности ^{222}Rn в различных скважинах по сравнению с установленным уровнем вмешательства (рис. 1).

Как видно из таблицы 1, превышение уровня вмешательства по ^{222}Rn составляет от 3,0 до 13,3 раза, по ^{226}Ra — от 1,5 до 2,9 раза. Наибольшие значения зафиксированы в точках Ну-робод, скв. №9 и районная больница.

Коэффициент корреляции Пирсона между активностями ^{222}Rn и ^{226}Ra составил $r = 0,89$ ($p < 0,01$), что указывает на сильную положительную связь и общий геохимический источник — урансодержащие породы, из которых происходит выщелачивание радионуклидов.

На рис. 1 представлена гистограмма распределения ^{222}Rn по скважинам (превышение норматива выделено красным).

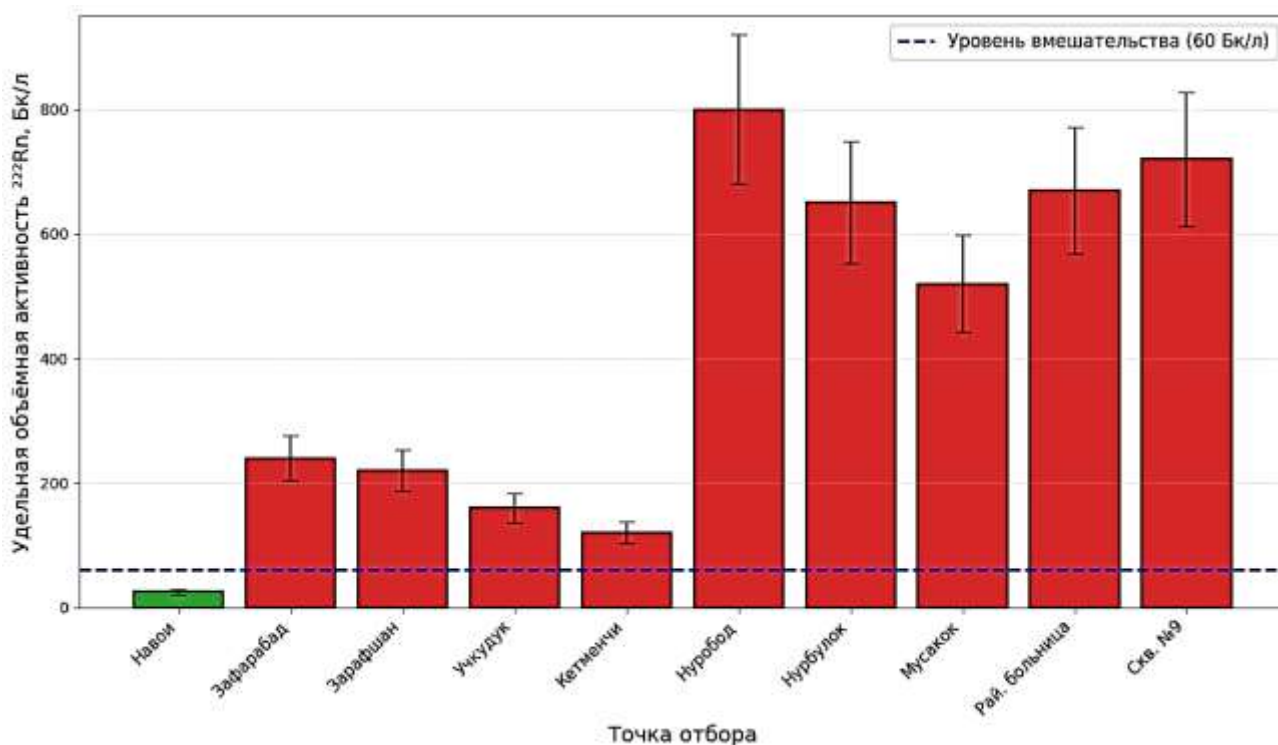


Рисунок 1. Удельная объёмная активность ^{222}Rn в подземных водах Кызылкумского региона (апрель 2025 г., $M \pm \sigma$)

На рис. 2 представлена гистограмма распределения ^{226}Ra (превышение норматива выделено красным).

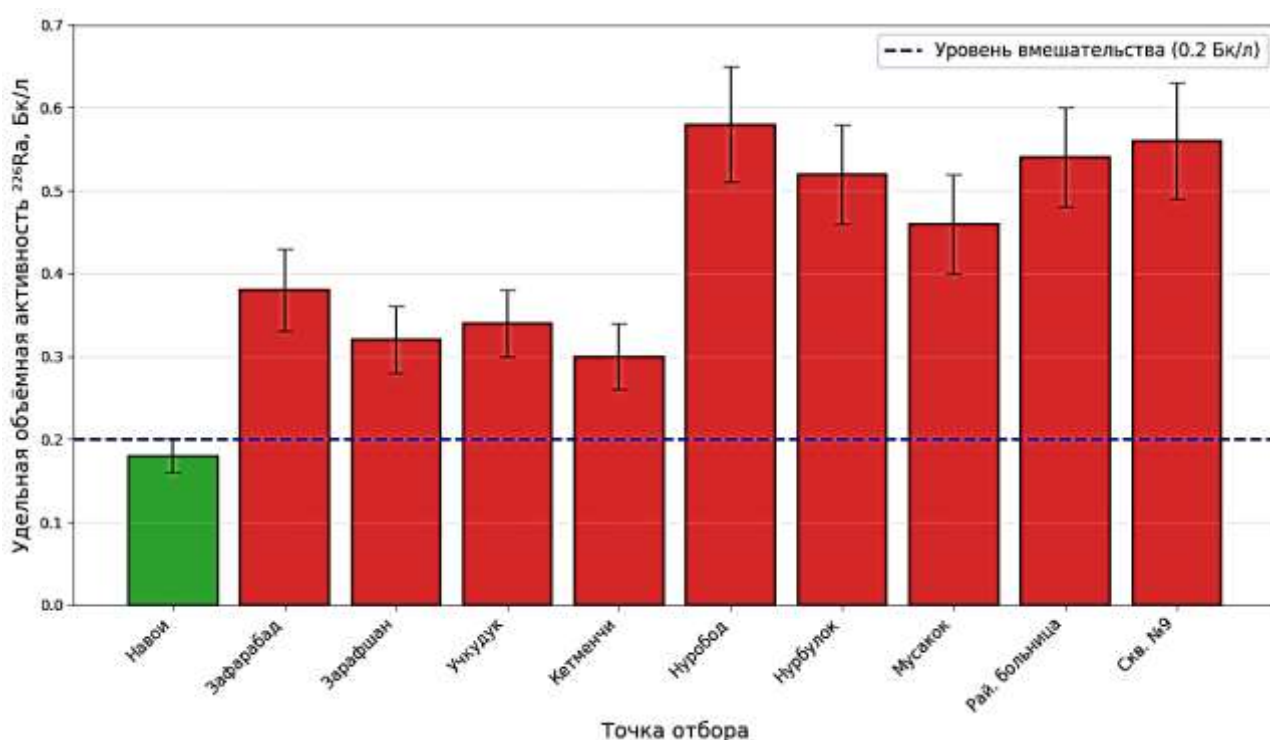


Рисунок 2. Удельная активность ^{226}Ra в подземных водах Кызылкумского региона (апрель 2025 г., $M \pm \sigma$)

Сопоставление с литературными данными. Полученные значения сопоставимы с результатами исследований в ураноносных регионах Казахстана (А.К. Айтжанова и др., 2021; активность ^{222}Rn до 650 Бк/л) и России (Уральский регион, Е.В. Зеленцова, 2020; до 700 Бк/л). Однако в Кызылкумском регионе зафиксированы более высокие максимальные значения (800 Бк/л), что, вероятно, связано с геологическими особенностями — близостью урановых рудопроявлений к водозаборным горизонтам и высокой трещиноватостью пород.

Обсуждение механизмов вариабельности. Наблюдаемые различия между скважинами обусловлены:

- геологическими факторами — неравномерным распределением урана и радия в почвах, что подтверждается рентгенофлуоресцентным анализом твёрдых проб;
- гидрогеологическими условиями — глубиной залегания водоносного горизонта, скоростью водообмена, наличием трещиноватых зон;
- физико-химическими параметрами — pH, Eh и ионным составом воды, влияющими на растворимость радионуклидов.

Ограничения исследования. Результаты получены на основе однократного сезонного отбора (апрель 2025 г.). Сезонная динамика (влияние уровня грунтовых вод, осадков, температуры) осталась не изученной. Для оценки годовых доз облучения необходим мониторинг в течение всех сезонов (4 раза в год).

Заключение

1. Установлено, что в 9 из 10 исследованных проб подземных вод Кызылкумского региона удельная объёмная активность ^{222}Rn превышает уровень вмешательства (60 Бк/л) в 3,0–13,3 раза; максимальное значение составило 800 Бк/л.

2. Удельная активность ^{226}Ra превышает норматив (0,2 Бк/л) в 1,5–2,9 раза; максимальное значение — 0,58 Бк/л.
3. Выявлена сильная положительная корреляция ($r = 0,89$, $p < 0,01$) между активностями ^{222}Rn и ^{226}Ra , что указывает на общий геохимический источник радионуклидов.
4. Вода из 9 из 10 скважин не соответствует радиационным нормативам и не рекомендуется для питьевого использования без предварительной обработки (интенсивная аэрация для удаления радона, применение сорбционных фильтров для радия). Исключение — скважина в г. Навои ($^{222}\text{Rn} = 25$ Бк/л, $^{226}\text{Ra} = 0,18$ Бк/л), вода которой соответствует нормативам.
5. Для достоверной оценки годовых доз облучения населения необходим регулярный сезонный мониторинг (не менее 4 раз в год) с учётом гидрогеологических и метеорологических факторов.
6. Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение сезонной динамики, изотопного состава и миграционных механизмов радионуклидов в системе «вода–порода».

Список литературы:

1. Asabina E.A. Radioactive series. Radon: textbook. - Nizhny Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 2024. - 41 p. Djenbaev B.M. et al. Radioactive Waste. — Egyptian Atomic Energy Authority, 2012. — 516 с.
2. Ilbekova K., Ibrayeva D., Aumalikova M., Bakhtin M. Radiation risk and cancer incidence: review // Science & Healthcare. — 2022. — Vol. 24, No. 2. DOI: 10.34689/SH.2022.24.2.021.
3. Jalilian A., Korde A., Starovoitova V. et al. Radioisotope Products and the Medicine of the Future: an IAEA Perspective // Bulletin of the Scientific Centre for Expert Evaluation of Medicinal Products. — 2022. — Vol. 12, No. 4. — P. 364–378.
4. Evseeva T.I., Maistrenko T.A., Geraskin S.A. et al. Distribution of uranium series radionuclides and their biological effects under conditions of environmental pollution // Theoretical and Applied Ecology. - 2012. - No. 2. - P. 13-19. Pfützner M., Karny M., Grigorenko L.V., Riisager K. Radioactive decays at limits of nuclear stability // Reviews of Modern Physics. — 2012. — Vol. 84. — P. 567. DOI: 10.1103/RevModPhys.84.567.
5. Springell R.S. et al. A review of uranium-based thin films // Advances in Physics. — 2023. — Vol. 71, No. 3–4. — P. 1–79. DOI: 10.1080/00018732.2023.2230292.
6. Vozzhenikov G.S., Belyshev Yu.V. Radiometry and Nuclear Geophysics. - Ekaterinburg, 2006. - 418 p.
7. Sapozhnikov Yu.A., Aliev R.A., Kalmykov S.N. Environmental Radioactivity: Theory and Practice. - 4th ed. - Moscow: Laboratory of Knowledge, 2025. - 289 p. - ISBN 978-5-93208-838-8.
8. Mukhin K.N. Experimental Nuclear Physics. In 3 vols. Vol. 2. Physics of Nuclear Reactions. - 8th ed. - St. Petersburg: Lan, 2025. - 320 p. - ISBN 978-5-507-50600-2.
9. Bekman I.N. Atomic and Nuclear Physics: Radioactivity and Ionizing Radiation. Moscow: Palmarium, 2020, 493 p. Maciejewski P., Ładziński J. Natural Radionuclides ^{222}Rn and ^{226}Ra in Shallow Groundwater of Nysa County (SW Poland): Concentrations, Background, and Radiological Risk // Water. — 2025. — Vol. 17, No. 17. — P. 2596. — DOI: 10.3390/w17172596.
10. Deepika D.N., Ambika M.R., Karthik Kumar M.B. et al. Radiological assessment of radium and dissolved radon in groundwater near the Manchanabele reservoir, Bengaluru, India // Radiation Physics and Chemistry. — 2025. — DOI: 10.1016/j.radphyschem.2025.112688.

11. Muzafarov A.M., Allaberganova G.M., Kulmatov R.A. Assessment of the radiation hazard of uranium enterprises for environmental objects // XXI century. Technosphere safety. - 2021. - Vol. 6, No. 1. - P. 94–102. Kutbedinov A.K., Muzafarov A.M. et al. Quantitative determination of radium and radon contents in natural waters of the uranium-bearing region // AIP Conference Proceedings. — 2025. — Vol. 3268, No. 1. — P. 040014.
12. Soliyev T.I., Muzafarov A.M. Investigation of the causes of violations of the radioactive balance between radionuclides of the uranium decay chain // International Journal of Multicultural and Multireligious Understanding. — 2021. — Vol. 8, No. 7.
13. Toshev O.S., Allaberganova G.M., Muzafarov A.M. Interdependence of the radiation environment with the redistribution of the energy of alpha particles of radionuclides in the natural decay chain of uranium // Universum: technical sciences. - 2026. - No. 2 (143). - URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/22018>. Soliyev T.I., Muzafarov A.M., Sherkulov U.D. Determination of mixing factors of daughter radionuclides in the uranium decay chain // NeuroQuantology. — 2022. — Vol. 20, No. 11. — P. 2722.
14. WHO. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. — Geneva: WHO, 2022. — 614 p.