

**ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И  
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**  
NUCLEAR, RADIATION AND  
ENVIRONMENTAL SAFETY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-03>

УДК [550.35:539.16]:574

EDN CXZMSN

Оригинальная статья / Original paper



**Распределение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения  
в городах Кавказских Минеральных Вод Ставропольского края  
Российской Федерации**

**Е.А. Бураева<sup>1</sup> , В.А. Бобылев<sup>1</sup> , И.В. Шишлов<sup>2</sup>, В.И. Ратушный<sup>3</sup> **

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация,

<sup>2</sup>Физический факультет Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

<sup>3</sup>Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская область, Российская Федерация

 [buraeva@sfedu.ru](mailto:buraeva@sfedu.ru)

**Аннотация.** Испытания ядерного оружия, аварии на атомных электростанциях способствовали значительному загрязнению территорий искусственными радионуклидами. При этом разработка уран-ториевых месторождений, наличие природных радиоактивных аномалий вносит наибольший вклад в коллективную эффективную дозу, получаемую населением Земли от природных источников ионизирующих излучений. В данной работе приведены результаты оценки радиационной обстановки в городах Кавказских Минеральных Вод (КМВ) Ставропольского края. В рамках исследования были проведены измерения гамма-фона в таких городах, как: Пятигорск, Кисловодск, Железноводск, Ессентуки и Лермонтов. Гамма-дозиметрия (измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма излучения, МЭД) проводилась на центральных улицах, в туристических/парковых зонах городов и в зонах с наиболее плотной застройкой методом пешеходной гамма-съемки на высоте 1 метр над землей при помощи дозиметра радиометра «ДРБП-03» с встроенным блоком детектирования «СБМ-20» и дозиметра-радиометра «ДКС 96» с блоком детектирования «БДКС 96с». Средние значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч) во всех городах составляют порядка 0,15 мкЗв/ч и характерны для населенных пунктов Юга Европейской части России, в том числе зоны наблюдения Ростовской АЭС. В целом, подобные исследования радиационной обстановки в курортных населенных пунктах, особенно в горных условиях, при наличии рудопроявления урана и вулканизма необходимо продолжать как для составления карт распределения МЭД гамма-излучения и выявления возможных природных и/или техногенных радиационных аномалий, так и для снижения социальной напряженности среди населения, связанной с радиофобией.

**Ключевые слова:** гамма-излучение, мощность амбиентного эквивалента дозы, Кавказские Минеральные воды, город-курорт, Ставропольский край, распределение.

**Для цитирования:** Бураева Е.А., Бобылев В.А., Шишлов И.В., Ратушный В.И. Распределение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в городах Кавказских Минеральных Вод Ставропольского края Российской Федерации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(4):30–36. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-03>

**For citation:** Buraeva E.A., Bobylev V.A., Shishlov I.V., Ratushnyj V.I. Distribution of ambient equivalent dose of gamma radiation in the cities of the Caucasian Mineral Waters Stavropol Region Russian Federation. *Nuclear Safety*. 2025;15(4):30–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-04-03>

## Distribution of ambient equivalent dose of gamma radiation in the cities of the Caucasian Mineral Waters Stavropol Region Russian Federation


E.A. Buraeva<sup>1</sup>  , V.A. Bobylev<sup>1</sup> , I.V. Shishlov<sup>2</sup>, V.I. Ratushnyj<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

<sup>2</sup>Faculty of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

<sup>3</sup>Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University

«MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

 buraeva@sfn.ru

**Abstract.** Nuclear weapons testing and accidents at nuclear power plants have contributed to significant contamination of territories with artificial radionuclides. Furthermore, the development of uranium-thorium deposits and the presence of natural radioactive anomalies make the largest contribution to the collective effective dose received by the Earth's population from natural sources of ionizing radiation. This paper presents the results of assessing the radiation situation in the cities of the Caucasian Mineral Waters (CMV) in the Stavropol Region. As part of the study, gamma background measurements were conducted in the following cities: Pyatigorsk, Kislovodsk, Zheleznovodsk, Yessentuki, and Lermontov. Gamma dosimetry (measurement of the ambient equivalent dose of gamma radiation) was carried out on central streets, in tourist/park areas of cities, and in areas with the most dense development using a pedestrian gamma camera at a height of 1 meter above the ground, using the DRBP-03 dosimeter-radiometer with the SBM-20 built-in detection unit and the DKS 96 dosimeter-radiometer with the BDKS 96s detection unit. The average values of the ambient equivalent dose of gamma radiation (AED,  $\mu\text{Sv/h}$ ) in all cities are approximately 0.15  $\mu\text{Sv/h}$ , which is typical for settlements in the southern part of European Russia, including the Rostov NPP. In general, such studies of the radiation situation in resort settlements, especially in mountainous areas with uranium ore deposits and volcanism, should be continued to compile maps of the distribution of gamma radiation and identify possible natural and/or man-made radiation anomalies, as well as to reduce social tensions among the population related to radiophobia.

**Keywords:** gamma radiation, ambient dose equivalent, Caucasian Mineral Waters, resort town, Stavropol Region, distribution.

### Введение

Развитие атомной промышленности, аварии на предприятиях атомной промышленности и испытания ядерного оружия приводят к значительному загрязнению территории радионуклидами. При этом добыча уран-ториевой руды способствует повышению дозовых нагрузок на население и окружающую среду от естественных радионуклидов. Среди городов-курортов Российской Федерации особо выделяются города Кавказских Минеральных Вод (далее – КМВ) с преобладающей туристической и гостиничной деятельностью, огромным комплексом санаториев, пансионатов и лечебно-оздоровительных учреждений различной направленности. КМВ это группа городов-курортов на юге России в Ставропольском крае, включающая в себя Пятигорск, Кисловодск, Ессентуки, Железноводск, Георгиевск, Лермонтов и Минеральные Воды. Города известны природой и лечебными свойствами горных источников. Пятигорск – главный город объединения, является крупнейшим городом

после Ставрополя по численности населения в крае и крупнейшим по тому же параметру на территории КМВ. Все города КМВ находятся на высоте порядка 500 метров над уровнем моря в окружении гор-лакколитов к северу и востоку от плато «Бермамыт», которое наступает со стороны Кисловодска. Экономически регион направлен на курортную отрасль, поэтому критически сильно загрязняющие окружающую среду предприятия на его территории практически отсутствуют.

На территории Ставропольского края отсутствуют зоны глобальных радиационных загрязнений (техногенного характера в результате радиационных аварий). Однако на основании результатов радиологических исследований на открытых территориях Предгорного района выявляются радиационные аномалии природного характера, связанные с урановыми рудопроявлениями, а также участки техногенного радиоактивного загрязнения (УРЗ) прошлых лет, образовавшиеся в результате деятельности предприятия по добыче урановых руд, например, бывшие

рудники №1 и №2, а также хвостохранилище, оставшееся после разработок урановой руды бывшего НПО «Алмаз» в г. Лермонтов<sup>1,2</sup>. Из-за наличия таких объектов, а также из-за географической специфики региона и необходимо тщательное наблюдение за радиационной обстановкой в данном регионе.

По результатам полевых исследований радиационной обстановки прошлых лет в КМВ было установлено, что значения МЭД гамма-излучения на территории КМВ варьируются от 0,15 мкЗв/ч до 0,30 мкЗв/ч. Также необходимо отметить, что в отдельных случаях МЭД достигает 0,5 мкЗв/ч и даже 0,8 мкЗв/ч на некоторых территориях вблизи городов Пятигорска и Лермонтова [1].

Стоит отметить, что общие экологические исследования региона Кавказских Минеральных Вод достаточно малочисленны, а работы, посвященные оценке радиационной обстановки, вообще носят единичный характер.

### Объекты и методы исследования

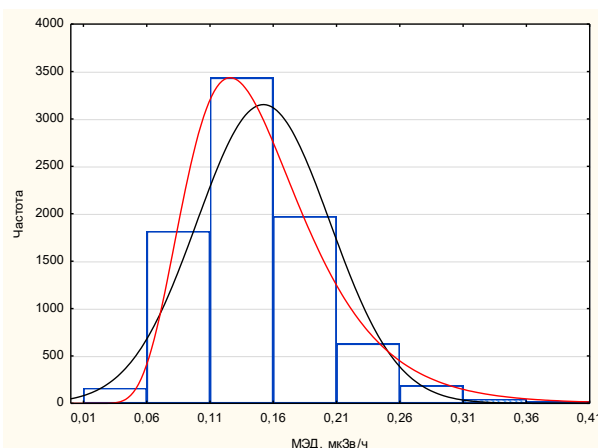
В качестве объектов исследования были выбраны наиболее густонаселенные города КМВ: Пятигорск, Кисловодск, Ессентуки, Железноводск и Лермонтов. Гамма-дозиметрия (измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма излучения, МЭД) проводилась на центральных улицах, в туристических/парковых зонах городов и в зонах с наиболее плотной застройкой методом пешеходной гамма-съемки на высоте 1 метр над землей при помощи дозиметра радиометра «ДРБП-03» с встроенным блоком детектирования «СБМ-20» и дозиметра-

радиометра «ДКС 96» с блоком детектирования «БДКС 96с».

### Результаты и их обсуждение

Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения является параметром, который отражает меру воздействия ионизирующего излучения на биологические ткани и, следовательно, с его помощью можно оценить степень опасности гамма-излучения для человека или группы людей. Для различных групп персонала существуют основные пределы доз, прописанные в Нормам радиационной безопасности НРБ-99/2009<sup>3</sup>.

Для анализа общего распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в городах Кавказских Минеральных Вод использовалась диаграмма распределения численности (рис. 1). В таблице 1, в свою очередь, приведены результаты статистического анализа распределения МЭД в данном регионе.



**Рисунок 1.** Распределение МЭД гамма-излучения на территории городов Кавказских Минеральных Вод [составлено авторами]

**Figure 1.** Distribution of the gamma radiation MED in the cities of the Caucasian Mineral Waters [compiled by the authors]

<sup>1</sup> О санитарно-эпидемиологической обстановке в Ставропольском крае в 2019 году: Государственный доклад. Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. Ставрополь. 2020. 179 с. Режим доступа: <https://26.rosпотребнадзор.ru/d/du/gd/?ysclid=mizvyg60ef701561224> (дата обращения: 18.09.2025).

<sup>2</sup> О санитарно-эпидемиологической обстановке в Ставропольском крае в 2024 году: Государственный доклад. Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. Ставрополь. 2025. 166 с. Режим доступа: <https://26.rosпотребнадзор.ru/d/du/gd/?ysclid=mizvyg60ef701561224> (дата обращения: 18.09.2025).

<sup>3</sup> СанПин 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г. Г. Онищенко от 7 июля 2009 № 47 с 01 сентября 2009 г. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=140797&ysclid=mizwdi6d59753489061> (дата обращения: 18.09.2025).

**Таблица 1.** Результаты статистической обработки данных по измеренной МЭД гамма-излучения на территории городов Кавказских Минеральных Вод за весь период наблюдения [составлено авторами]

**Table 1.** Results of statistical processing of data on the measured gamma radiation MED in the cities of the Caucasian Mineral Waters for the entire observation period [compiled by the authors]

Параметр	Значение
Минимум, мкЗв/ч	0,01
Максимум, мкЗв/ч	0,46
Среднее арифметическое, мкЗв/ч	0,15
Среднее геометрическое, мкЗв/ч	0,14
Медиана, мкЗв/ч	0,14
Мода, мкЗв/ч	0,14
Стандартное отклонение, мкЗв/ч	0,05
Коэффициент вариации, %	33
Асимметричность, отн. ед.	0,86
Эксцесс, отн. ед.	1,71
W-критерий, отн. ед.	0,96
Количество измерений, шт	8268

Как видно из таблицы 1, средние значения МЭД, мода и медиана совпадают в пределах как стандартного отклонения, так и в пределах погрешности метода полевой гамма-дозиметрии территорий (35%). Положительный эксцесс свидетельствует об островершинности распределения МЭД гамма-излучения. Кроме того, проверка на нормальность критерием Шапиро-Уилка при уровне значимости 0,01, указывает на то, что распределение МЭД сводится к нормальному при значении критерия 0,96 (более 0,5), что полностью соответствует критериям проверки на нормальность.

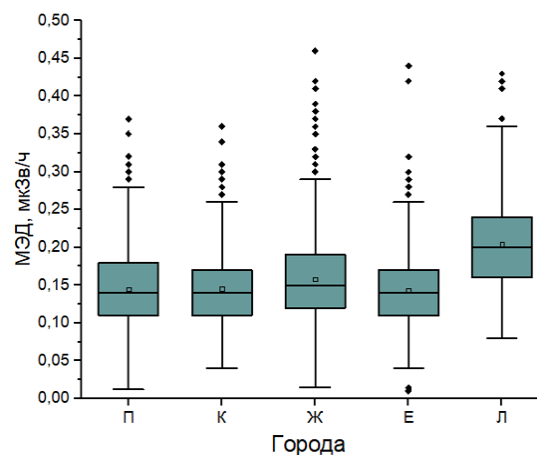
В связи с вышесказанным, для описания общей радиоэкологической обстановки в городах КМВ далее будет использоваться среднее арифметическое значение МЭД гамма-излучения (0,15 мкЗв/ч, табл.1). Также необходимо подчеркнуть, что в целом подобные величины МЭД гамма-излучения характерны для регионов Юга Европейской части России [2] Нормами радиационной безопасности Российской Федерации (НРБ-99/2009).

Единичные высокие значения МЭД гамма-излучения могут быть обусловлены местными проявлениями вулканизма, рудопроявлениями урана и связанного с ним по-

вышенного содержания радона в окружающей среде. Результаты, полученные в настоящей работе сопоставимы с данными, полученными в упоминаемых ранее исследованиях, проведенных в регионе (0,15-0,30 мкЗв/ч) [1].

Несмотря на близкое расположение исследуемых городов-курортов, все же каждый из них имеет свои собственные географические, экономические или популяционные особенности, которые напрямую или опосредованно влияют на распределение МЭД гамма-излучения. Сравнительный анализ МЭД в каждом из городов-курортов гамма-фонов городов-курортов КМВ позволит локализовать источник возможного загрязнения, чтобы в последующих исследованиях можно было сосредоточить внимание на проблемном участке.

На рисунке 2 и в таблице 2 представлены особенности распределения МЭД гамма-излучения в отдельных городах КМВ. Средние, модальные и медианные значения МЭД гамма-излучения в Пятигорске, Кисловодске, Железноводске и Ессентуках незначительно отличаются друг от друга и не превышают НРБ-99/2009, что позволяет сделать вывод о том, что влияние, как антропогенных, так и естественных факторов на гамма-фон в каждом из городов сопоставимо.



**Рисунок 2.** Распределение МЭД гамма-излучения в городах КМВ: Пятигорск (П), Кисловодск (К), Железноводск (Ж), Ессентуки (Е), Лермонтов (Л) [составлено авторами]

**Figure 2.** Distribution of gamma radiation in the cities of the KCMV: Pyatigorsk (P), Kislovodsk (K), Zheleznovodsk (Z), Yessentuki (E), Lermontov (L) [compiled by the authors]



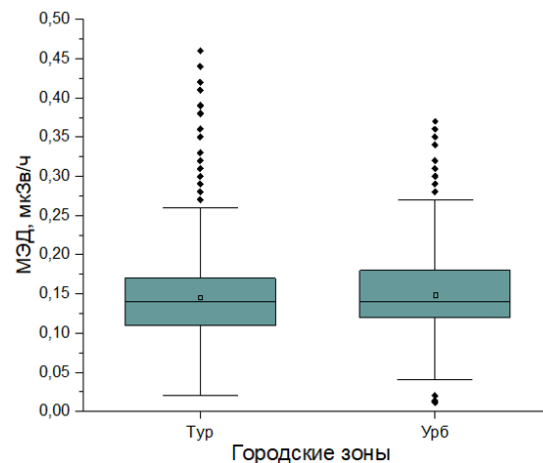
**Таблица 2.** Результаты статистической обработки МЭД гамма-излучения: Пятигорск (П), Кисловодск (К), Железноводск (Ж), Ессентуки (Е), Лермонтов (Л) [составлено авторами]

**Table 2.** Results of statistical processing of the MED of gamma radiation: Pyatigorsk (P), Kislovodsk (K), Zheleznovodsk (Z), Yessentuki (E), Lermontov (L) [compiled by the authors]

Параметр	Город				
	П	К	Ж	Е	Л
Ср. арифм., мкЗв/ч	0,14	0,15	0,16	0,14	0,20
Ср. геом., мкЗв/ч	0,13	0,14	0,15	0,14	0,20
Минимум, мкЗв/ч	0,01	0,04	0,01	0,01	0,08
Максимум, мкЗв/ч	0,37	0,36	0,46	0,44	0,43
Медиана, мкЗв/ч	0,14	0,14	0,15	0,14	0,20
Мода, мкЗв/ч	0,14	0,12	0,14	0,13	0,19
Станд. откл., мкЗв/ч	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06
Коэффициент вариации, %	36	33	31	36	30
Кол-во измерений, шт	2115	2029	1925	1681	518

Стоит отметить город Лермонтов со средним значением МЭД 0,20 мкЗв/ч (табл. 2), что несколько превышает характерный для Юга России гамма-фон (0,12–0,14 мкЗв/ч [3,4]. В данном случае повышенный фон можно связать с нахождением около города Лермонтова объектов, служивших в прошлом для добычи урана. Для более точной локализации участков с повышенным гамма-фоном в черте города необходимы обширные исследования радиационной обстановки на его территории.

На рисунке 3 и в таблице 3 представлены особенности распределения МЭД гамма-излучения в парковых районах (Тур) и в районах с жилой застройкой и промышленными предприятиями (Урб). Гамма-фон как в парковых, так и в жилых зонах городов-курортов КМВ сопоставим в пределах стандартного отклонения.



**Рисунок 3.** Распределение МЭД гамма-излучения на территориях, дифференцированных по степени антропогенного влияния. Тур – парковые городские зоны, Урб – зоны с жилой застройкой [составлено авторами]

**Figure 3.** Distribution of the gamma radiation MRE in areas differentiated by the degree of anthropogenic influence. Tur – park urban areas, Urb – residential areas [compiled by the authors]

**Таблица 3.** Результаты статистической обработки данных по измеренной МЭД гамма-излучения: Тур – парковые городские зоны, Урб – зоны с жилой застройкой [составлено авторами]

**Table 3.** Results of statistical processing of data on the measured gamma radiation MRE: Tur – park urban areas, Urb – residential areas [compiled by the authors]

Параметр	Зона	
	Тур	Урб
Минимум, мкЗв/ч	0,02	0,01
Максимум, мкЗв/ч	0,46	0,37
Среднее арифм., мкЗв/ч	0,15	0,15
Среднее геом., мкЗв/ч	0,14	0,14
Стандартное отклонение, мкЗв/ч	0,05	0,05
Количество измерений, шт	2807	4943

## Заключение

Анализ особенности распределения гамма-фона на территориях городов Кавказских Минеральных Вод показал, что МЭД в исследованных населенных пунктах не превышает значений, рекомендованных Нормами радиационной безопасности НРБ 99/2009 Российской Федерации (0,30 мкЗв/ч) и в среднем составляет 0,15 мкЗв/ч. Не выявлены значимые различия в уровнях МЭД гамма-излучения в различных городах КМВ.

В целом, подобные исследования радиационной обстановки в курортных населенных пунктах, особенно в горных условиях,

при наличии рудопоявления урана и вулканизма необходимо продолжать как для составления карт распределения МЭД гамма-излучения и выявления возможных природных и/или техногенных радиационных аномалий, так и для снижения социальной напряженности среди населения, связанной с радиофобией.

Необходимо подчеркнуть, что подобные исследования могут служить «нулевым фоном» для конкретных территорий с особенными природно-климатическими и геологическими условиями, что особо актуально для горных регионов с естественным повышенным радиационным фоном от горных пород

и радона. Данные о распределении гамма-фона в регионах в дальнейшем могут быть использованы для однозначной идентификации возможных техногенных воздействий на экосистемы и население, что особо актуально при оценке радиационной обстановки вблизи объектов, служивших в прошлом для добычи урана, а также для зон наблюдения объектов атомной энергетики.

Таким образом, исследование пространственного распределения МЭД гамма-излучения в рекреационных зонах необходимо и для верификации моделей распространения радиоактивных элементов от объектов ядерной топливной энергетики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Khorzova L.I., Sidyakin P.A., Yanukyan E.G. Radiation situation at construction sector objects in Caucasus Mineral Waters region and prospects of its decrease. *International conference on industrial engineering*. 2016;150:2031–2035. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.289>
2. Плахотная Д.П., Бураева Е.А., Ратушный В.И. Радиоэкологическая обстановка на отдельных территориях Южного федерального округа. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):22–28. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-03>
- Plahotnyaya D.P., Buraeva E.A., Ratushnyj V.I. Radioecological situation in certain areas of the Southern Federal District. *Nuclear Safety*. 2024;14(1):22–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-03>
3. Buraeva, E.A., Malomyzheva, N.V. Distribution of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation in specially protected natural areas of the Rostov region. *Radiation and Risk*. 2023;32(2):120–131. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-2-120-131>
4. Бураева Е.А., Маломыжева Н.В., Каменев О.В. Особенности распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в крупных промышленных центрах Ростовской области. *Экология промышленного производства*. 2022;4:54–59. [https://doi.org/10.52190/2073-2589\\_2022\\_4\\_54](https://doi.org/10.52190/2073-2589_2022_4_54)
- Buraeva E.A., Malomyzheva N.V., Kamenev O.V. Features of the Distribution of the Equivalent Dose Power of Gamma Radiation in Large Industrial Centers of the Rostov Region. *Ecology of industrial production*. 2022;4:54–59. [https://doi.org/10.52190/2073-2589\\_2022\\_4\\_54](https://doi.org/10.52190/2073-2589_2022_4_54)

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Бураева Е.А.** – общее руководство работой, выполнение измерений мощности AMBIENTного эквивалента дозы гамма-излучения в регионах Ставропольского края, написание и редактирование текста статьи, обобщение и анализ данных, подбор литературных источников;

**Бобылев В.А.** – выполнение измерений мощности AMBIENTного эквивалента дозы гамма-излучения в регионах Ставропольского края, обработка и статистический анализ данных, оформление статьи, подбор литературных источников;

**Шишлов И.В.** – выполнение измерений мощности AMBIENTного эквивалента дозы гамма-излучения в регионах Ставропольского края, обработка и статистический анализ данных, оформление статьи, подбор литературных источников;

**Ратушный В.И.** – общее руководство работой, написание и редактирование текста статьи, обобщение и

#### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Buraeva E.A.** – general management of the work, measurements of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation in the in the Stavropol Region districts, writing and editing the text of the article, summarizing and analyzing data, selecting literary sources;

**Bobylev V.A.** – performing measurements of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation in the Stavropol Region districts, processing and statistical analysis of data, preparation of the article, selection of literary sources;

**Shishlov I.V.** – performing measurements of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation in the Stavropol Region districts, processing and statistical analysis of data, preparation of the article, selection of literary sources;

**Ratushnyj V.I.** – general management of the work, writing and editing the text of the article, summarizing and

анализ данных, подбор литературных источников.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(ГЗ0110/23-11-ИФ).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2023-0010/ГЗ0110/23-11-ИФ).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Бураева Елена Анатольевна**, кандидат химических наук, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт физики, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-0928-1617>

e-mail: buraeva@sfedu.ru

**Бобылев Вячеслав Александрович**, лаборант-исследователь, Научно-исследовательский институт физики, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-2214-0616>

e-mail: bobylev@sfedu.ru

**Шишлов Иван Владимирович**, ассистент кафедры общей физики, аспирант 1 года обучения, физический факультет, Южный федеральный университет; г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

e-mail: shishlov@sfedu.ru

**Виктор Иванович Ратушный**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических дисциплин, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-5701-6279>

e-mail: IRatushnyj@mephi.ru

analyzing data, selecting literary sources.

#### FUNDING:

The research was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State assignment in the field of scientific activity 2023). Project No. FENW-2023-0010/(GZ0110/23-11-IF).

#### CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

#### ACKNOWLEDGMENTS:

The research was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State assignment in the field of scientific activity 2023). Project No. FENW-2023-0010/(GZ0110/23-11-IF).

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Elena A. Buraeva**, Cand. Sci. (Chem.), Dr. Sci. (Bio.), Associate Professor, Leading Researcher, Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-0928-1617>

e-mail: buraeva@sfedu.ru

**Vyacheslav A. Bobylev**, Research Assistant, Scientific Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-2214-0616>

e-mail: bobylev@sfedu.ru

**Ivan V. Shishlov**, Assistant of the Department of General Physics, 1st-year postgraduate student, Faculty of Physics, Southern Federal University; Rostov-on-Don, Russian Federation.

e-mail: shishlov@sfedu.ru

**Viktor I. Ratushnyj**, Dr. Sci. (Phys. and Math), Professor, Head of the Department of Physical and Mathematical Disciplines, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-5701-6279>

e-mail: IRatushnyj@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 09.10.2025

После доработки / Revision 10.12.2025

Принята к публикации / Accepted 15.12.2025