

УДК 504.055

МНОГОЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ МОЩНОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА ЗОНЫ НАБЛЮДЕНИЯ РОСТОВСКОЙ АЭС

Бураева Елена Анатольевна¹,
buraeva@sfedu.ru

Иванков Дмитрий Васильевич¹,
ivankov@sfedu.ru

Маломыжева Наталья Викторовна¹,
lila.2013@yandex.ru

Бобылев Вячеслав Александрович¹,
slava_bobelev@mail.ru

Безуглова Ольга Степановна¹,
osbesuglova@sfedu.ru

¹ Южный федеральный университет,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью непрерывного и независимого мониторинга зоны наблюдения Ростовской АЭС. В России атомная промышленность постоянно развивается, и исследования, связанные с изучением радиационной обстановки на территориях, расположенных в непосредственной близости от предприятий ядерного-топливного цикла, становятся обязательными.

Цель: оценка особенностей распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на контрольных участках зоны наблюдения Ростовской АЭС.

Объекты: территория, расположенная в 30-километровой зоне наблюдения Ростовской АЭС.

Методы: дозиметрический контроль приземного слоя воздуха методом пешеходной гамма-съемки по всему контрольному участку с помощью поисковых дозиметров-радиометров; отбор поверхностных проб почв методом конверта (со стороны квадрата 10 м) из прикопок глубиной 10 см; инструментальный гамма-спектрометрический метод радионуклидного анализа проб почв.

Результаты. Представлены данные о результатах многолетнего (2000–2021 гг.) исследования мощности эквивалентной дозы гамма-излучения и удельной активности естественных радионуклидов и искусственного радиоцезия в зоне размещения Ростовской АЭС. Исследования проводились на контрольных участках, заложенных в рамках предупредительного мониторинга данного объекта (определение так называемого «нулевого фона»). Показано, что в среднем гамма-фон варьирует в пределах 0,10–0,14 мкЗв/ч, не превышает результатов предупредительного мониторинга зоны наблюдения Ростовской АЭС и зависит от радионуклидного состава почвенного покрова. Средние арифметические удельные активности радионуклидов в почвах варьируют в пределах: 10,4–23,3, 14,7–25,5, 16,0–32,6 и 319,4–575,5 для ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K, соответственно. В целом деятельность Ростовской АЭС не оказывает влияния на радиационную обстановку на территории исследования.

Ключевые слова:

распределение, мощность эквивалентной дозы гамма-излучения, АЭС, мониторинг, радиация.

Введение

Атомные электростанции (АЭС) в настоящее время являются безопасными и экологически чистыми источниками электроэнергии, естественно, при соблюдении всех действующих правил и норм эксплуатации. В Российской Федерации расположено 10 действующих АЭС, среди которых и Ростовская (ранее Волгодонская). Мониторинг радиационной обстановки в зоне влияния АЭС необходим не только для контроля безопасности данного объекта, но и для информирования населения с целью снижения социальной напряженности.

Одним из параметров, определяющих радиационную обстановку в пределах санитарно-защитных зон и зон наблюдения предприятия ядерной топливной энергетики (ЯТЭ), является мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч), или гамма-фон. МЭД на предприятиях ЯТЭ контролируется как вну-

ренными службами, так и при помощи автоматизированных систем (АСКРО). Результаты такого контроля радиационной обстановки на территории Российской Федерации представлены в онлайн-режиме [1], а также вместе с оценками концентраций радионуклидов в объектах экосферы в различных отчетах [2, 3].

Помимо официальных отчетов, радиационному контролю в санитарно-защитных зонах и в зонах наблюдения предприятий ядерного топливного цикла на территории Российской Федерации и других государств посвящено множество независимых исследований. Они охватывают исследования донных отложений и подземных вод [4–10], водоемов охладителей [11–14], флоры и фауны водоемов охладителей [15–18], объемной активности ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co в приземном слое воздуха [19], в прибрежных отложениях [20, 21], а также наземной экосистемы, где удельная активность ¹³⁷Cs в почве варьируется в широких пре-

делах от 7,5 до 92,3 Бк/кг и среднее значение МЭД гамма-излучения не превышает 0,15 мкЗв/ч [22–29]. Ряд исследований посвящены изучению радиационной обстановки на территориях после аварий на АЭС [30–36]. На Ростовской АЭС также проводится многолетний независимый радиэкологический мониторинг в тридцатикилометровой зоне наблюдения. По результатам многолетних исследований содержание ^{137}Cs в почвах изменяется от 0,6 до 108,5 Бк/кг [37], за период наблюдения отсутствует превышение значений выбросов сверх установленных пределов [38, 39].

Целью данной работы является оценка особенностей распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на контрольных участках зоны наблюдения Ростовской АЭС.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в пределах 30-километровой зоны наблюдения Ростовской АЭС (РоАЭС). Контрольные участки (КУ) были заложены в рамках предпускового мониторинга зоны наблюдения РоАЭС в 1999–2000 гг. (определение так называемого «нулевого фона») [40]. Данная территория расположена в зоне каштановых почв, представляет собой слабоволнистую семиаридную степь, расчлененную

древними балками и оврагами. Большую часть зоны наблюдения РоАЭС занимает приплотинный участок Цимлянского водохранилища [40]. Климат умеренно-континентальный с достаточно холодными зимами и жарким засушливым летом. Значительную часть зоны наблюдения РоАЭС занимают пашни, выпасы и сенокосные угодья.

КУ закладывали на целинных или залежных землях. Выбирали, по возможности, выровненные территории, не планируемые к распашке. Номера КУ, их расположение и типы почв приведены в табл. 1 и на рис. 1.

На контрольных участках (мониторинговых площадках) достаточно разнообразный растительный покров. Некоторые КУ (12, 118а, 133а, 201) характеризуются луговым разнотравьем. На данных площадках произрастают тысячелистник благородный (*Achillea nobilis*), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare*), цикорий (*Cichorium intybus*), марьянник полевой (*Melampyrum arvense*), полынь австрийская (*Artemisia austriaca*), а также различные злаки. Участки КУ 3 и 75а представляют собой полынно-злаковую степь, здесь преобладают полынь австрийская (*Artemisia austriaca*), овсяница валлиская (*Festuca valesiaca*) и мятлик луговой (*Poa pratensis*).



Рис. 1. Карта-схема отбора почвенных проб в зоне наблюдения Ростовской АЭС

Fig. 1. Map-scheme of soil sampling in the observation zone of the Rostov NPP

Таблица 1. Почвы зоны наблюдения Ростовской АЭС
Table 1. Soils of the observation zone of the Rostov NPP

Шифр КУ Code number	Годы исследований Years of research	Тип почвы Soil types
3	2000–2021	Темно-каштановая солонцеватая тяжело-суглинистая на лессовидных суглинках Dark chestnut saline heavy loamy on loess-like loams
12	2000–2021	Лугово-каштановая мощная тяжело-суглинистая на лессовидных суглинках Meadow-chestnut powerful heavy loam on loess-like loams
75a	2000–2021	Каштановая солонцеватая тяжело-суглинистая на лессовидных суглинках Chestnut saline heavy loamy on loess-like loams
188a	2000, 2001, 2005, 2006, 2014	Лугово-каштановая мощная тяжело-суглинистая на лессовидных суглинках Meadow-chestnut powerful heavy loam on loess-like loams
133a	2000, 2005, 2006, 2018–2021	Темно-каштановая солонцеватая тяжело-суглинистая на лессовидных суглинках Dark chestnut saline heavy loamy on loess-like loams
201	2000–2021	Аллювиально-луговая легкосуглинистая на аллювиальных погребенных отложениях Alluvial-meadow light loamy on alluvial buried sediments

Дозиметрический контроль (измерение МЭД гамма-излучения) на всех контрольных участках вели портативными поисковыми дозиметрами-радиометрами СРП-88н и ДРБП-03 на высоте 2–3 и 100 см от поверхности почвы (в местах отбора почвенных проб) и методами пешеходной гамма-съемки по всему контрольному участку. За весь период мониторинга было проведено более 7000 измерений МЭД. Для интерпретации значений МЭД на различных КУ были отобраны образцы почв методом конверта (со стороны квадрата 10 м) из прикопок глубиной 10 см [41].

Все почвенные пробы высушивали при температуре $t=100$ °С, измельчали, просеивали через сито с размером ячейки 1,0 мм и герметично упаковывали в счетные геометрии Маринелли 1 л, Маринелли 0,5 л, Чашка Петри, Дента 0,02 л (диск высотой 7 мм и диаметром 70 мм) в зависимости от количества отобранной пробы.

Удельную активность ^{137}Cs и естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) в почвах определяли инструментальным гамма-спектрометрическим методом радионуклидного анализа. Использовали низкофоновую спектрометрическую установку на основе полупроводникового коаксиального детектора из особо чистого германия (GeHP) с эффективностью 25 % в диапазоне 13–1500 кэВ, отношением пик/компонент 51.7:1 (модель 7229N-7500sl-2520, Canberra Corporate Headquarters, Франция) и гамма-спектрометр «Прогресс-гамма сцинтилляционный» на основе NaI(Tl) детектора. Применяли стандартные методики отбора, подготовки и измерения почвенных проб [42, 43]. Время набора гамма-спектров составляло от 1 до 24 часов, в зависимости от геометрий счетного образца. Погрешность измерения удельной активности ра-

дионуклидов не превышала 30 % (в основном 10–15 %).

Статистическая обработка результатов измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на контрольных участках в зоне наблюдения Ростовской АЭС проводилась при помощи программного обеспечения Excel MsOffice, Origin, Statistica. Для проверки вида распределения МЭД в работе применялись критерии проверки гипотезы о нормальном распределении данных Шапиро–Уилка и Колмогорова–Смирнова. Для сравнения данных в работе использовали t-критерий Стьюдента и критерий Фишера.

Результаты и их обсуждение

Гамма-фон (мощность эквивалентной дозы гамма-излучения) является одним из основных факторов, определяющих радиационную обстановку на территориях. В зонах наблюдения предприятий ядерной топливной энергетики гамма-фон подлежит обязательному контролю. На рис. 2 и в табл. 2 приведены результаты оценки мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в разные годы в приземном слое воздуха на высоте 100 см от поверхности почвы (грунта) на контрольных участках.

Все полученные данные сравнивались с «нулевым фоном» [40].

Как правило, распределение гамма-фона на КУ зоны наблюдения Ростовской АЭС достаточно равномерное, при этом строго не подчиняется ни нормальному, ни логарифмически нормальному законам распределения. Также средние арифметические, средние геометрические, модальные и медианные значения МЭД в районе исследования варьируют в пределах неопределенности измерения (стандартного отклонения). Поэтому в данной работе для оценки изменения гамма-фона в зоне наблюдения использовали среднее арифметическое значение МЭД. На рис. 3 представлены результаты длительных (20 лет) измерений МЭД на различной высоте от поверхности почвы в 30-километровой зоне наблюдения Ростовской АЭС.

МЭД, измеренная в период мониторинговых исследований зоны наблюдения Ростовской АЭС, не превышает «нулевой фон» (рис. 3) [40]. При этом гамма-фон у поверхности почвы несколько выше, чем на высоте 100 см. Это обусловлено, как правило, тем, что поглощение (рассеяние) низкоэнергетического (с энергиями менее 100–150 кэВ) гамма-излучения от природных радионуклидов (например, от ^{234}Th , ^{210}Pb) выше на расстоянии 100 см от почвы. Дополнительным фактором может быть несколько большая запыленность надпочвенного слоя воздуха. Не стоит исключать и влияние гамма-излучающих продуктов распада радона и торона на гамма-фон в надпочвенном слое воздуха, особенно в засушливые периоды. Для оценки влияния Ростовской АЭС на гамма-фон в зоне наблюдения был проведен сравнительный анализ данного параметра с гамма-фоном, определенном в 2000 г. (в рамках предпускового мониторинга) [40]. В табл. 3 представлены результаты сравнения МЭД, определенной в каждом году, с «нулевым фоном» с использованием t-критерия Стьюдента.

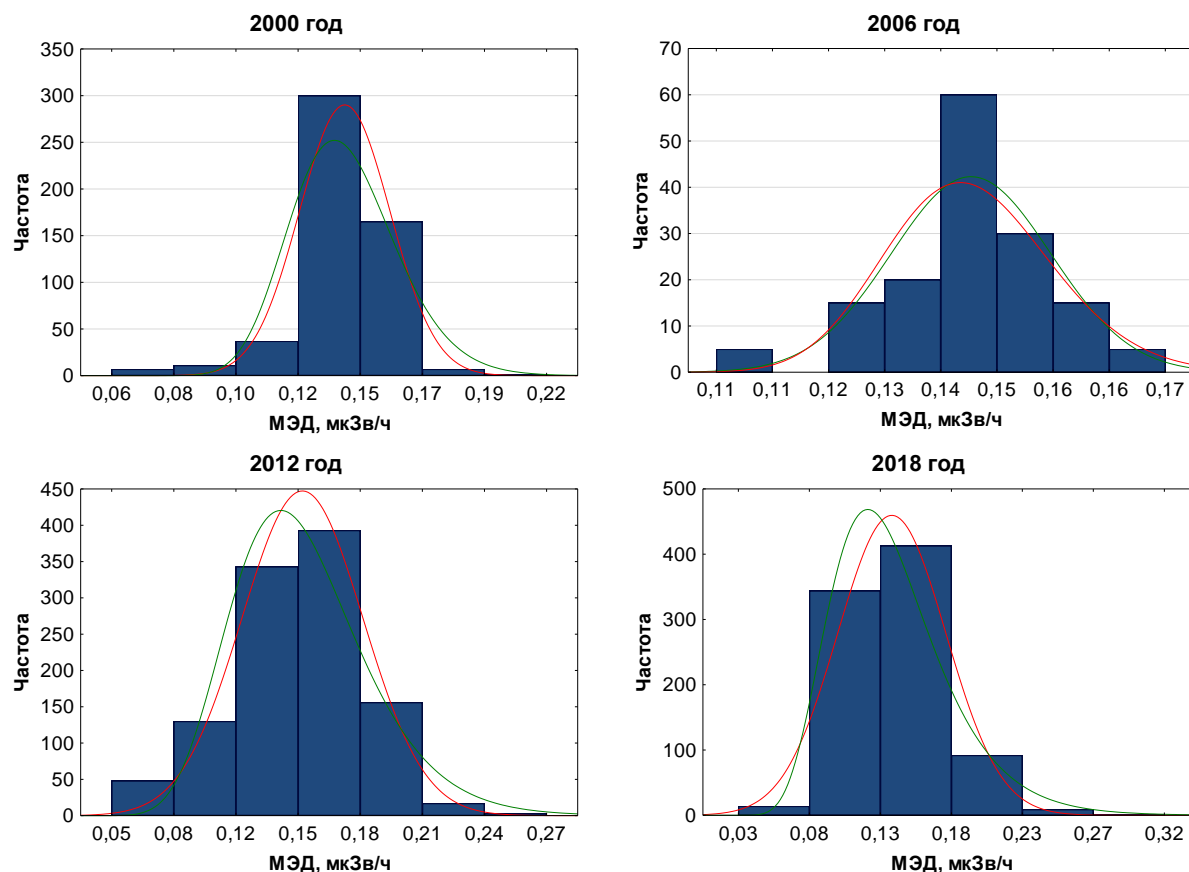


Рис. 2. Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС в различные годы

Fig. 2. Distribution of the equivalent dose rate of gamma radiation in the observation zone of the Rostov NPP in different years

Таблица 2. Результаты статистической обработки данных по распределению мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС

Table 2. Results of statistical processing of data on distribution of the equivalent dose rate of gamma radiation in the observation area of the Rostov NPP

Параметр/Parameter	Год/Year				
	2000	2006	2010	2015	2021
Минимум, мкЗв/ч/Minimum, $\mu\text{Sv/h}$	0,057	0,106	0,020	0,054	0,010
Максимум, мкЗв/ч/Maximum, $\mu\text{Sv/h}$	0,215	0,173	0,200	0,324	0,240
Среднее арифметическое, мкЗв/ч Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,141	0,144	0,116	0,147	0,128
Среднее геометрическое, мкЗв/ч Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,140	0,143	0,107	0,144	0,122
Медиана, мкЗв/ч/Median, $\mu\text{Sv/h}$	0,145	0,146	0,115	0,135	0,130
Мода, мкЗв/ч/Mode, $\mu\text{Sv/h}$	0,150	0,146	0,080	0,162	0,110
Стандартная ошибка, мкЗв/ч Mean-square error, $\mu\text{Sv/h}$	0,0007	0,0010	0,0076	0,0012	0,0013
Стандартное отклонение, мкЗв/ч Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	0,016	0,012	0,043	0,029	0,037
Дисперсия выборки/Sample variance	0,0003	0,0001	0,0019	0,0008	0,0014
Экцесс/Kurtosis	6,25	2,34	-0,26	2,71	0,13
Асимметричность/Asymmetry	-1,59	-0,53	0,27	0,18	0,29
Распределение Колмогорова–Смирнова Kolmogorov–Smirnov distributions (D/D _{табл})	0,168/ 0,059	0,129/ 0,111	–	0,196/ 0,059	0,081/ 0,047
Критерий Шапиро–Уилка, Shapiro–Wilk statistics ($W^2/W_{крит}^2$)	–	–	0,958/ 0,930	–	–
Количество измерений, шт Number of measurements, pcs	528	150	32	592	821

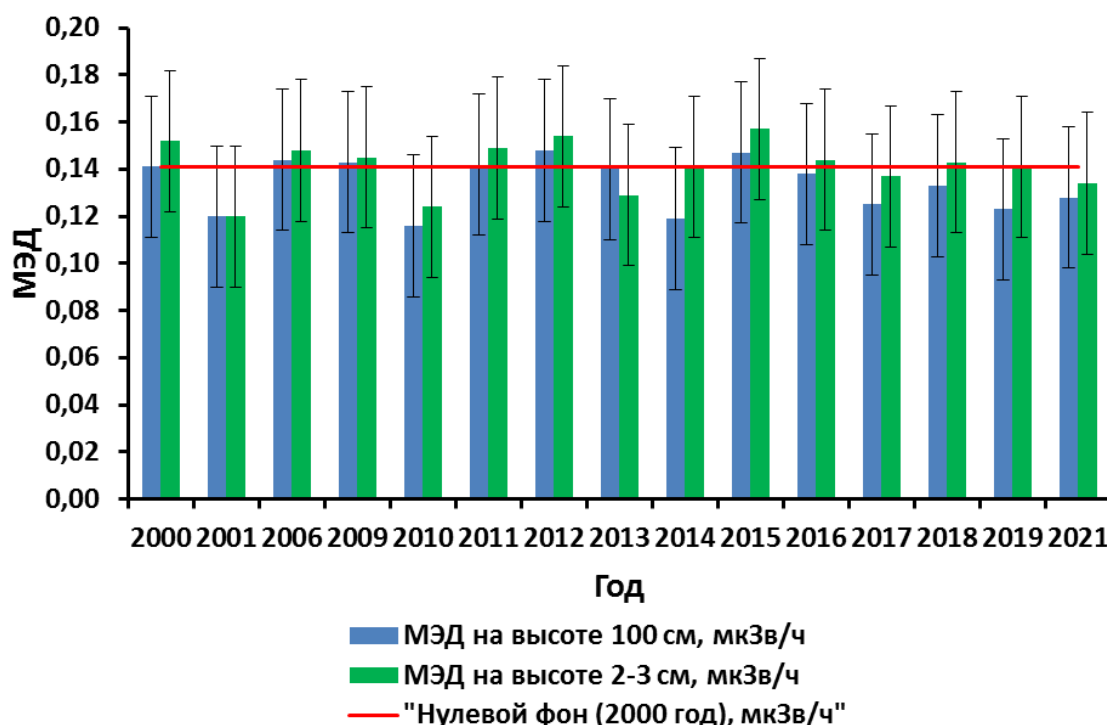


Рис. 3. Изменение средней арифметической мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС

Fig. 3. Change in the equivalent dose rate of gamma radiation in the observation zone of the Rostov NPP

Таблица 3. Результаты сравнительного анализа мощности эквивалентной дозы гамма-излучения с результатами предпускового мониторинга (2000 г.)

Table 3. Results of a comparative analysis of the equivalent dose rate of gamma radiation with the results of pre-launch monitoring (2000)

Год Year	Средняя арифм. МЭД, мкЗв/ч Average arithmetic, EDR, $\mu\text{Sv/h}$	$F_{\text{расч}}/F_{\text{крит}}$	$t_{\text{расч}}/t_{\text{крит}}$	$K_{\text{расч}}$	Различие МЭД, мкЗв/ч Difference in EDR, $\mu\text{Sv/h}$
2001	0,120	1,54/2,20	12,29/1,64	182	0,023
2002	0,138	1,31/2,20	0,90/1,64	33	–
2006	0,144	1,91/2,20	3,53/1,64	327	–0,004
2009	0,141	2,62/2,20	0,18/1,67	70	–
2010	0,116	6,89/2,20	5,84/1,69	31	0,040
2011	0,142	2,44/2,20	0,37/1,68	47	–
2012	0,148	3,35/2,20	1,86/1,64	1594	–0,002
2013	0,140	6,50/2,20	3,22/1,64	264	0,008
2014	0,119	6,54/2,20	15,71/1,64	410	0,037
2015	0,147	3,12/2,20	1,45/1,64	953	–
2016	0,138	4,62/2,20	9,13/1,64	1269	0,013
2017	0,126	3,42/2,20	14,69/1,64	885	0,021
2018	0,133	5,25/2,20	11,71/1,64	1296	0,017
2019	0,123	4,16/2,20	19,98/1,64	1540	0,025
2021	0,128	5,20/2,20	16,32/1,64	1214	0,024

Как видно из табл. 3, средняя арифметическая МЭД гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС варьирует в зависимости от года измерения. При этом все вариации (различия в МЭД по сравнению с «нулевым фоном» 0,141 мкЗв/ч) не превышают стандартного отклонения (неопределенности измерения – 30 %). Ежегодные вариации МЭД связаны с тем, что гамма-фон природных территорий в основном обусловлен излучением от радионуклидов, содержащихся в почве (таких как естественные радионуклиды рядов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , искусственный ^{137}Cs), плотностью потока радона с поверхности почвы и космического излучения (в том числе и от солнечной радиации).

При этом доля космического излучения и солнечной радиации достаточно сильно зависит от высоты над уровнем моря и широты расположения мониторинговых площадок [44]. При отсутствии значимых высотных и широтных вариаций на разных контрольных участках (мониторинговых площадках) вклад космического излучения и солнечной радиации в гамма-фон на всех КУ принято считать одинаковым. Следовательно, в вариациях гамма-фона в пределах мониторингового года на различных площадках и изменениях МЭД по годам в зоне наблюдения РоАЭС особую роль будут играть удельные активности естественных и искусственных радионуклидов, содержащихся в почвах, подстилающих породах и растениях (в том числе и

эманация радона с поверхности почвы), и, возможно, климатические условия в период экспедиций.

Для подтверждения вышесказанного в работе был проведен сравнительный анализ распределения МЭД

на отдельных КУ в зоне наблюдения Ростовской АЭС. Для этого в отдельные годы проводились дополнительные измерения гамма-фона на контрольных площадках (рис. 4, табл. 4).

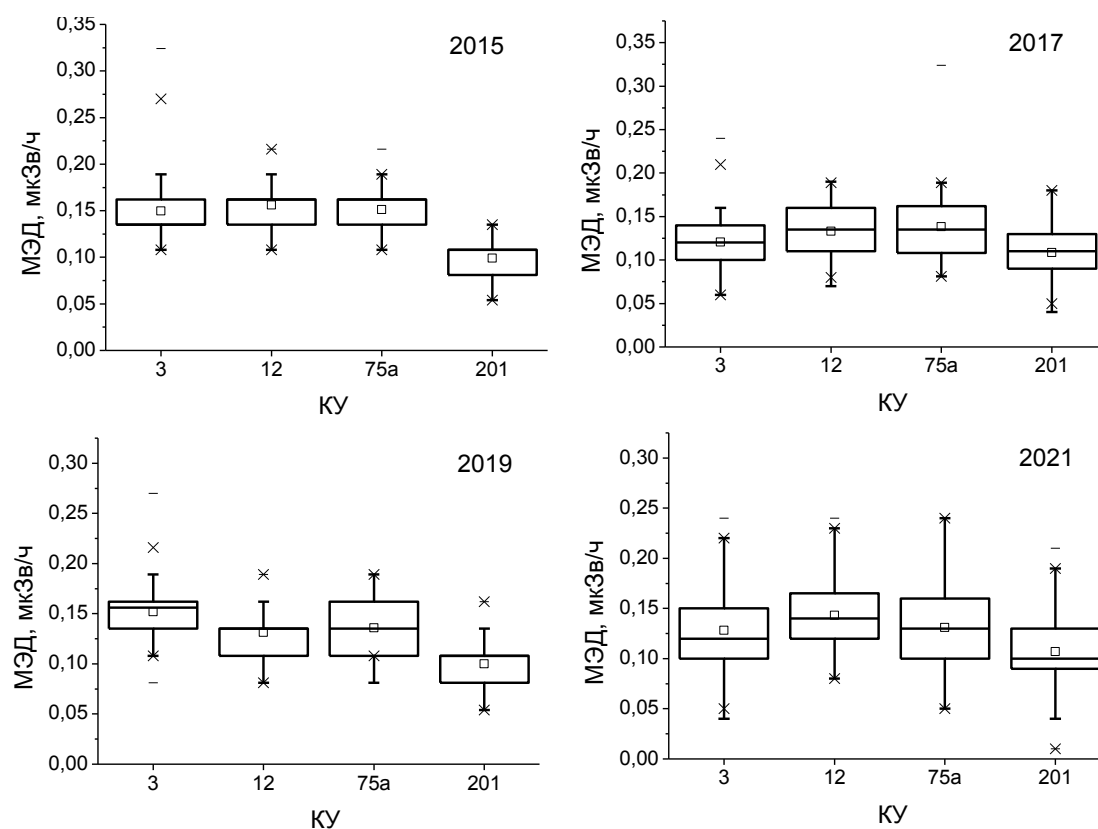


Рис. 4. Распределение мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС на различных контрольных участках

Fig. 4. Distribution of the equivalent dose rate of gamma radiation in the observation zone of the Rostov NPP in various control areas

Таблица 4. Результаты статистической обработки данных по распределению мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в зоне наблюдения Ростовской АЭС на различных контрольных участках

Table 4. Results of statistical processing of data on the distribution of the equivalent dose rate of gamma radiation in the observation zone of the Rostov NPP in various control sites

Параметр/Parameter	Шифр контрольного участка/Code number			
	3	12	75a	201
2015				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,150	0,156	0,151	0,099
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,147	0,155	0,150	0,097
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	0,029	0,022	0,022	0,020
Количество измерений, шт./Number of measurements, pcs	167	162	153	60
2017				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,121	0,133	0,138	0,109
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,117	0,131	0,135	0,105
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	0,028	0,026	0,031	0,029
Количество измерений, шт./Number of measurements, pcs	140	179	109	140
2019				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,152	0,131	0,136	0,100
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,150	0,129	0,134	0,098
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	0,027	0,024	0,023	0,021
Количество измерений, шт./Number of measurements, pcs	195	221	220	201
2021				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,128	0,143	0,131	0,107
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	0,124	0,139	0,126	0,101
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	0,034	0,034	0,037	0,034
Количество измерений, шт./Number of measurements, pcs	190	191	190	190

Минимальные значения гамма-фона ежегодно фиксируются на КУ 201. Этот участок, расположенный в пойме р. Дон, отличается наличием аллювиально-луговых почв с высоким содержанием песка.

Для подтверждения этого на рис. 5 и в табл. 5 представлены результаты определения удельной активности естественных радионуклидов и искусственного радиоцезия в верхнем (0–10 см) слое почвы на КУ.

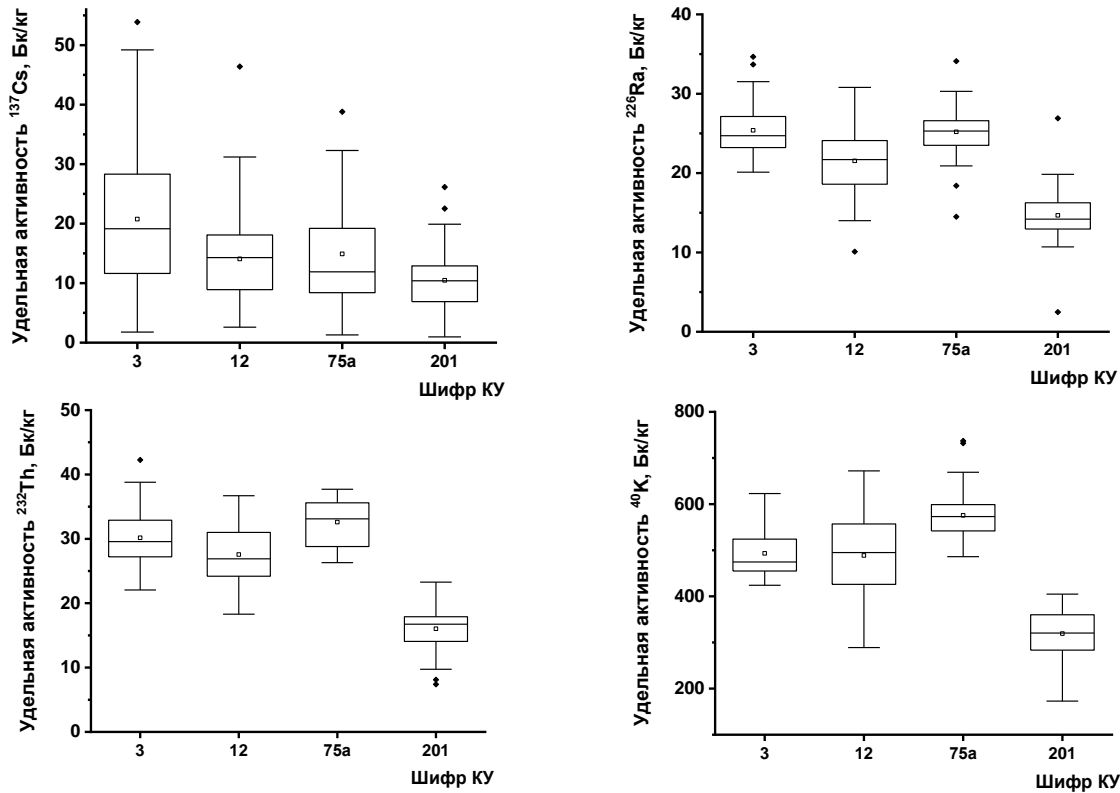


Рис. 5. Распределение удельной активности радионуклидов на контрольных участках
 Fig. 5. Distribution of the activity concentrations of radionuclides in the control sites

Таблица 5. Результаты статистической обработки данных по концентрации радионуклидов в почвах зоны наблюдения Ростовской АЭС на различных контрольных участках

Table 5. Results of statistical processing of data on the concentration of radionuclides in the soils of the observation zone of the Rostov NPP at various control sites

Параметр/Parameter	Шифр контрольного участка/Code number			
	3	12	75a	201
^{137}Cs				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	23,3	13,8	14,6	10,4
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	19,1	11,9	11,8	8,6
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	13,4	7,9	9,11	5,6
^{226}Ra				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	25,5	21,6	25,2	14,7
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	25,3	21,1	24,9	14,2
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	3,6	4,6	3,4	3,5
^{232}Th				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	30,3	27,6	32,6	16,0
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	30,0	27,1	32,4	15,6
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	4,3	4,7	3,5	3,5
^{40}K				
Среднее арифметическое, мкЗв/ч/Arithmetic mean, $\mu\text{Sv/h}$	493,3	488,6	575,5	319,4
Среднее геометрическое, мкЗв/ч/Geometric mean, $\mu\text{Sv/h}$	490,8	479,4	573,3	315,1
Стандартное отклонение, мкЗв/ч/Standard deviation, $\mu\text{Sv/h}$	51,8	91,5	52,1	50,9

Примечание: Количество измерений на каждом участке 45 штук.
 Note: Number of measurements on each site is 45 pieces.

Как видно из рис. 5 и табл. 5, минимальное содержание естественных радионуклидов фиксируется на КУ 201 с аллювиально-луговыми почвами. Такие почвы с высоким содержанием песка обладают высокой водо-

проницаемостью и низкой сорбцией радионуклидов [45, 46]. Вариации радиоцезия на разных КУ связаны с неравномерным выпадением данного радионуклида после аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) и последу-

юшей его латеральной и радиальной миграцией [47, 48]. Стоит также учитывать, что, хотя мониторинговые исследования в зоне наблюдения РоАЭС проводятся примерно в одно время (с июня по сентябрь), в отдельные годы наблюдаются различные погодные условия. Для летнего сезона семиаридных степей Ростовской области характерно чередование длительных засушливых периодов с обильными осадками (ливнями) [49].

Заключение

По результатам многолетнего мониторинга на контрольных участках в зоне наблюдения Ростовской АЭС мощность эквивалентной дозы гамма-излучения составляет 0,10–0,14 мкЗв/ч и не превышает резуль-

татов предпускового мониторинга («нулевой фон»). Вариации гамма-фона на контрольных участках региона исследования связаны как с удельной активностью естественных и искусственных радионуклидов в почвах, так и, возможно, с погодными особенностями в различные временные периоды.

Ростовская АЭС не оказывает влияния на радиационную обстановку в 30-ти километровой зоне наблюдения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № 0852-2020-0032), (БА30110/20-3-07ИФ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная обстановка на предприятиях Росатома. URL: <https://www.russianatom.ru> (дата обращения 12.09.2022).
2. Отчет по экологической безопасности за 2021 год. – Волгоград: Росэнергоатом. Ростовская АЭС, 2022. – С. 37. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/863/8634c4a0f3bffa9cfa5981a2384eab92.pdf> (дата обращения 12.09.2022).
3. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2021 году. Ежегодник. – Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», Росгидромет, 2022. – С. 37. URL: https://www.rpatuphoon.ru/upload/medi alibrary/f39/ezhegodnik_го_2021_.pdf (дата обращения 12.09.2022).
4. Белоусова А.П., Захарова Т.В., Швеи В.М. Мониторинг гидросферы в районах расположения АЭС // Водные ресурсы. – 1992. – Т. 19. – № 3. – С. 127–134. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32686075> (дата обращения 12.09.2022).
5. Белоусова А.П. Мониторинг подземных вод в районах расположения АЭС // Разведка и охрана недр. – 2015. – № 4. – С. 65–71. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23251664_54918649.pdf (дата обращения 12.09.2022).
6. Assessment of heavy metals and radionuclides in ground water and associated human health risk appraisal in the vicinity of Rooppur nuclear power plant, Bangladesh / T.R. Choudhury, J. Ferdous, Md.M. Haque, Md.M. Rahman, S.B. Qurashi, M.S. Rahman // Journal of Contaminant Hydrology. – 2022. – V. 251. – P. 104072.
7. Бураева Е.А. Радиоэкологический мониторинг водных экосистем района Ростовской АЭС // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 3 (3). – С. 83–92. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18089088> (дата обращения 12.09.2022).
8. Радиоэкологический мониторинг водных экосистем района расположения Балаковской АЭС / С.В. Рязанов, Е.Н. Писаренко, П.Е. Антонов, А.Ю. Хубецов // Теоретическая и прикладная экология. – 2009. – № 3. – С. 31–34. URL: <http://envjournal.ru/ari/v2009/v3/09306.pdf> (дата обращения 12.09.2022).
9. Comprehensive radioecological monitoring of freshwater ecosystems in the vicinity of Rooppur NPP (People’s Republic of Bangladesh) / R. A. Mikailova, D. N. Kurbakov, E. V. Sidorova, I. V. Geshel, N. V. Andreeva, Yu. V. Sorokin, A. V. Panov // Marine Biological Journal. – 2020. – V. 5. – № 3. – P. 30–54. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/7ab8/bc5e7d25f45f5d118839b5c82e168ae5ad18.pdf?_ga=2.257093579.1107403703.1663140917-63571462.1658920840 (дата обращения 12.09.2022).
10. Радиоэкологический мониторинг водных экосистем района расположения Балаковской АЭС / С.В. Рязанов, Е.Н. Писаренко, П.Е. Антонов, А.Ю. Хубецов // Теоретическая и прикладная экология. – 2009. – № 3. – С. 31–34. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12929243_12304055.pdf (дата обращения 12.09.2022).
11. Воронин М.Ю. Многолетний мониторинг макрозообентоса водоема-охладителя Балаковской АЭС // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: химия. Биология. Экология. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 461–472. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42316313_82532784.pdf (дата обращения 12.09.2022).
12. Marciulioniene D., Montvydiene D. The cooling pond of Ignalina NPP as a model system evaluating effect of radioactive, chemical and thermal pollution to aquatic plants // 8th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2011. – Lithuania, 2011. – P. 111617. URL: https://www.researchgate.net/publication/266440825_The_cooling_pond_of_Ignalina_NPP_as_a_model_system_evaluating_effect_of_radioactive_chemical_and_thermal_pollution_to_aquatic_plants (дата обращения 12.09.2022).
13. Dyachenko T.M., Zub L.N., Tomchenko O.V. Plant cover transformation in the shallow water habitats of the cooling pond of the chernobyl npp as a result of its descent // Hydrobiological Journal. – 2021. – V. 57. – Iss. 6. – P. 3–16. URL: <https://www.dl.begellhouse.com/journals/38cb2223012b73f2,22723b9c5aeaa0ca2791842e75d5426b.html#> (дата обращения 12.09.2022).
14. A review of uncertainties in the assessment of the radiological impact of liquid releases to the Ignalina NPP cooling pond lake Driūkšiai / V. Ragaišis, P. Poškas, R. Kilda, G. Bartkus // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – V. 157. – P. 108228. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454921001043?via%3Dihub> (дата обращения 12.09.2022).
15. Changes in the planktonic system of the nuclear power plant cooling pond related to the invasion of Dreissenidae (Mollusca: Bivalvia) / A. Protasov, T. Novoselova, Y. Uzunov, S. Barinova, A. Sylaieva // Acta Zoologica Bulgarica. – 2021. – V. 73. – Iss. 2. – P. 275–288. URL: <https://acta-zoologica-bulgarica.eu/2021/002433.pdf> (дата обращения 12.09.2022).
16. Anthropogenic radionuclides in water samples from the Chernobyl exclusion zone / R. Querfeld, W. Schulz, J. Neubohn, G. Steinhaue // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2018. – V. 318. – Iss. 1. – P. 423–428. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10967-018-6030-y> (дата обращения 12.09.2022).
17. Dynamics of specific activity of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in representatives of ichthyofauna of chernobyl exclusion zone / A. Ye. Kaglyan, D.I. Gudkov, S.I. Kireev, V.G. Klenus, V.V. Belyaev, L.P. Yurchuk, V.V. Drozdov, O.O. Hupalov // Nuclear Physics and Atomic Energy. – 2021. – V. 22. – Iss. 1. – P. 62–73. DOI: 10.15407/jnpae2021.01.062
18. Radionuclides contamination of leaves of woody plants growing within the chNPP cooling pond / V.K. Shynkarenko, S.A. Paskevych, Y.A. Menshenin, O.O. Odintsov // Nuclear Physics and Atomic Energy – 2021. – V. 22. – Iss. 2. – P. 157–166. DOI: 10.15407/jnpae2021.02.157
19. Мониторинг радиоактивности приземного слоя воздуха и атмосферных выпадений в районе расположения АЭС / И.И. Крышев, В.Г. Булгаков, А.И. Крышев, М.Н. Каткова, Т.Г. Сазыкина, Н.Н. Павлова, И.В. Косых, В.Д. Гниломедов, А.А. Бурякова, И.Я. Газиев // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126. – № 4. – С. 228–234. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37584549> (дата обращения 12.09.2022).
20. Changes in radioactive cesium concentrations from 2011 to 2017 in Fukushima coastal sediments and relative contributions of radioactive cesium-bearing microparticles / A. Kubo, K. Tanabe, Y. Ito, T. Ishimaru, M. Otsuki, H. Arakawa, Y.W. Watanabe, H. Miura, D. Tsumune, J. Kanda // Marine Pollution Bulletin. – 2020. – V. 161. – P. 111769. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33091633/> (дата обращения 30.09.2022).

21. The distributions of ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the northwest Pacific seawater in the winter of 2012 / F. Deng, F. Lin, W. Yu, J. He, F. Wang, Z. Chen // *Marine Pollution Bulletin*. – 2020. – V. 152. – P. 110900. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32479281/> (дата обращения 30.09.2022).
22. Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wildland fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020 / M. Talerko, I. Kovalets, T. Lev, Y. Igarashi, O. Romanenko // *Atmospheric Pollution Research*. – 2021. – V. 12. – Iss. 3. – P. 193–204. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104221000210?via%3Dihub> (дата обращения 30.09.2022).
23. Six-year monitoring of the vertical distribution of radiocesium in three forest soils after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident / J. Takahashi, Y. Onda, D. Hihara, K. Tamura // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2019. – V. 210. – P. 105811. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29982001/> (дата обращения 30.09.2022).
24. Charro E., Pardo R., Pena V. Chemo metric interpretation of vertical profiles of radionuclides in soils near a Spanish coal-fired power plant // *Chemosphere*. – 2013. – № 90. – P. 488–496. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22967929/> (дата обращения 30.09.2022).
25. Baseline radioactivity and associated radiological hazards in soils around a proposed nuclear power plant facility, South-South Nigeria / G.B. Ekong, T.C. Akpa, I. Umaru, M.A. Akraowo, S.D. Yusuf, N.U. Benson // *Journal of African Earth Sciences*. – 2021. – V. 182. – P. 104289. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464343X21001904?via%3Dihub> (дата обращения 30.09.2022).
26. Ковалёва Е.В., Черникова А.М. Радиоэкологический мониторинг территории вблизи Нововоронежской АЭС и её влияние на окружающую среду урбандиафтов // *Вектор ГеоНаук*. – 2021. – Т. 4. – № 1. – С. 54–65. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/radioekologicheskii-monitoring-territorii-vbliz-povovoronzhskoy-aes-i-eyo-vliyanie-na-okruzhayushuyu-sredu-urbandshtafvov/viewer> (дата обращения 12.09.2022).
27. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в районе Белоярской АЭС / А.В. Панов, А.В. Трасезников, В.К. Кузнецов, А.В. Коржавин, Н.Н. Исамов, И.В. Гешель // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 146–157. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45536801_95408761.pdf (дата обращения 12.09.2022).
28. Радиоэкологический мониторинг наземных экосистем в районе расположения Балтийской АЭС / Н.В. Андреева, Е.И. Карпенко, В.К. Кузнецов, С.Н. Нуштаев // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. – 2019. – Т. 30. – № 1–2. – С. 105–120. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41271301> (дата обращения 12.09.2022).
29. Анализ результатов радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Курской АЭС / В.К. Кузнецов, А.В. Панов, Н.И. Санжарова, Н.Н. Исамов, Н.В. Андреева, И.В. Гешель, Е.В. Сидорова // *Радиационная гигиена*. – 2020. – Т. 13. – № 2. – С. 19–30. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44094463_95154702.pdf (дата обращения 12.09.2022).
30. Migration processes of radioactive cesium in the Fukushima near-shore area: impacts of riverine input and resuspension. / T. Misonou, T. Nakanishi, T. Tsuruta, T. Shiribiki, Y. Sanada // *Marine Pollution Bulletin*. – 2022. – № 178. – P. 113597 URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35366555/> (дата обращения 30.09.2022).
31. Role of natural organic matter on iodine and ²³⁹, ²⁴⁰Pu distribution and mobility in environmental samples from the northwestern Fukushima Prefecture, Japan / Ch. Xu, S. Zhang, Y. Sugiyama, N. Ohte, Yi-F. Ho, N. Fujitake, D.I. Kaplan, Ch.M. Yeager, K. Schwehr, P.H. Santschi. // *J. Environ. Radioact.* – 2016. – V. 153. – P. 156–166.
32. Additional report of the Japanese Government to the IAEA – The Accident at TEPCO’s Fukushima Nuclear Power Stations (Second Report) // *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. – Tokyo: Government of Japan, 2011. – 45 p. URL: <https://reliefweb.int/report/japan/report-japan-government-iaea-ministerial-conference-nuclear-safety-accident-tepco> (дата обращения 30.09.2022).
33. Sources and effects of ionizing radiation. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident // *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008)*. – New York, 2016. – P. 45–221.
34. Men Wu. Discharge of contaminated water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident into the Northwest Pacific: what is known and what needs to be known // *Marine Pollution Bulletin*. – 2021. – P. 112984. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34583249/> (дата обращения 30.09.2022).
35. Современное состояние плодородия почв радиоактивно загрязненных пойменных экосистем Брянской области / А.Л. Силаев, Г.В. Чекин, Е.В. Смольский, А. Новиков // *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2020. – № 6 (82). – С. 10–16. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44346210_64132058.pdf (дата обращения 12.09.2022).
36. Радиоэкологический мониторинг зоны наблюдения Волгоградской АЭС / Е.А. Бураева, М.Г. Давыдов, Л.В. Зорина, М.А. Кобцева, В.В. Стасов // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2010. – № 5. – С. 154а–159. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14340752> (дата обращения 12.09.2022).
37. Панов А.В., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К. Радиационно-экологический мониторинг в регионе размещения Ростовской АЭС. Анализ результатов многолетних исследований // *Радиационная гигиена*. – 2019. – Т. 12. – № 2 (специальный выпуск). – С. 54–65. URL: <https://www.radhyg.ru/jour/article/view/629/631> (дата обращения 12.09.2022).
38. Коновалов А.В., Лебедев В.А., Коновалов М.А. Влияние Ростовской атомной станции на безопасность жизнедеятельности населения Ростовской области // *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2018. – № 4. – С. 62–65. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36825231_60328042.pdf (дата обращения 12.09.2022).
39. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 году. Ежегодник. – Обнинск: Научно-производственное объединение «Тайфун», 2021. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/mediainfo/187/ezhegodnik_2020.pdf (дата обращения 12.09.2022).
40. Определение нулевого фона радиоактивного загрязнения земной поверхности района размещения Ростовской АЭС по программе экологического мониторинга: отчет / отв. исп. М.Г. Давыдов – Ростов-на-Дону: Центр радиационной экологии и технологии, 2000. – 96 с.
41. ГОСТ Р 3091-2008. Качество почвы. Отбор проб. Ч. 3. Руководство по безопасности. – М.: Стандартинформ, 2009. – 20 с.
42. Инструментальное определение урана и тория в природных объектах / И.В. Бодров, Е.А. Бураева, М.Г. Давыдов, С.А. Марескин // *Атомная энергия*. – 2004. – Т. 96. – Вып. 4. – С. 271–276. URL: <http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya-196-4-2004/go,28/> (дата обращения 12.09.2022).
43. Компоненты фона Ge(Li)- и GeНР-детектора в пассивной защите / Е.А. Бураева, М.Г. Давыдов, Л.В. Зорина, В.В. Стасов // *Атомная энергия*. – 2007. – Т. 103. – Вып. 5. – С. 318–322. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11685546> (дата обращения 12.09.2022).
44. Ларин А.Е., Малышевский В.С., Фомин Г.В. Высотное и широтное распределение скорости производства ⁷Ве в земной атмосфере в модели «PARMA» // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2014. – Т. 57. – № 6. – С. 88–92. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21800559> (дата обращения 12.09.2022).
45. Безуглова О.С., Хырхырова М.М. Почвы Ростовской области. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. – 350 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19514324> (дата обращения 12.09.2022).
46. Носкова Л.М., Шуктомова И.И. Особенности распределения радия в техногенных почвах в зависимости от их физико-химических и минералогических характеристик. // *Геохимия*. – 2015. – № 11. – С. 1043–1050. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24730277_22802865.pdf (дата обращения 12.09.2022).
47. Features of ¹³⁷Cs distribution and dynamics in the main soils of the steppe zone in the southern European Russia / Е.А. Burayeva, O.S. Bezuglova, V.V. Stasov, V.S. Nefedov, E.V. Dergacheva,

- A. A. Goncharenko, S. V. Martynenko, L. Yu. Goncharova, S. N. Gorbov, V. S. Malyshevsky, T. V. Varduny // Geoderma. – 2015. – № 259–260. – P. 259–270. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23973984> (дата обращения 12.09.2022).
48. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Ю.А. Израэль, С.М. Вакуловский, В.А. Ветров, В.Н. Петров, Ф.Я. Ровинский, Е.Д. Стукин. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 223 с.
49. Научно-прикладной справочник «Климат России» / В.Н. Разуваев, О.Н. Булыгина, Н.Н. Коршунова, Л.К. Клещенко, В.Н. Кузнецова, Л.Т. Трофименко, А.Б. Шерстюков, Н.В. Швець, С.Г. Давлетшин, Г.Н. Зверева. 2018. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/> (дата обращения 12.09.2022)

Поступила 19.09.2022 г.

Прошла рецензирование 31.10.2022 г.

Информация об авторах

Бураева Е.А., кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института физики, Южный федеральный университет.

Иванков Д.В., аспирант, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет.

Маломыжева Н.В., лаборант-исследователь Научно-исследовательского института физики, Южный федеральный университет.

Бобылев В.А., лаборант-исследователь Научно-исследовательского института физики, Южный федеральный университет.

Безуглова О.С., доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет.

UDC 504.055

RESULTS OF LONG-TERM RADIOECOLOGICAL MONITORING OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS IN THE OBSERVATION ZONE OF THE ROSTOV NPP

Elena A. Buraeva¹,
buraeva@sfedu.ru

Dmitry V. Ivankov¹,
ivankov@sfedu.ru

Natalya V. Malomyzheva¹,
llia.2013@yandex.ru

Vyacheslav A. Bobylev¹,
slava_bobelev@mail.ru

Olga S. Bezuglova¹,
osbesuglova@sfedu.ru

¹ Southern Federal University,
194, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

The relevance of the study is caused by the need for continuous and independent monitoring of the observation zone of the Rostov NPP. In Russia, the nuclear industry is constantly developing and research related to the study of the radiation situation in the territories located in the immediate vicinity of nuclear fuel cycle enterprises is becoming necessary.

The main aim of the study is to evaluate the features of distribution of the equivalent dose of gamma radiation in the control areas of the observation zone of the Rostov NPP.

Objects: the territory located in the 30-kilometer observation zone of the Rostov NPP.

Methods: dosimetric control by pedestrian gamma-ray shooting throughout the control area; soil sampling by the envelope method (with a side of a square of 10 m) from digs with a depth of 10 cm; instrumental gamma-spectrometric method of radionuclide analysis of soil samples.

Results. The paper presents the data on the results of a long-term (2000–2021) study of the equivalent dose rate of gamma radiation in the area where the Rostov NPP is located. The studies were carried out on the control sites established as part of the pre-launch monitoring of this object (definition of «zero background»). Dosimetry of the territories was carried out using search dosimeters-radiometers. It is shown that, on average, the gamma background varies within 0,10–0,14 $\mu\text{Sv/h}$, does not exceed the results of pre-start monitoring of the Rostov NPP observation zone, and depends on the radionuclide composition of the soil cover.

Key words:

distribution, equivalent dose rate of gamma radiation, nuclear power plant (NPP), monitoring, radiation.

Research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State assignment in the field of scientific activity, Southern Federal University, no. 0852-2020-0032, 2020).

REFERENCES

1. *Radiatsionnaya obstanovka na predpriyatiyakh Rosatoma* [Radiation situation at Rosatom enterprises]. Available at: <https://www.russianatom.ru> (accessed 12 September 2022).
2. *Otchet po ekologii cheskoj bezopasnosti za 2021 god* [Environmental Safety Report for 2021]. Volgogradsk, Rosenergoatom. Rostovskaya AES, 2022. 37 p. Available at: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/863/8634c4a0f3bbfa9cfa5981a2384eab92.pdf> (accessed 12 September 2022).
3. *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredelnykh gosudarstv v 2021 godu. Ezhegodnik* [Radiation situation on the territory of Russia and neighboring states in 2021. Yearbook]. Obninsk, FGBU «NPO «Tayfun», Rosgidromet, 2022. 350 p. Available at: https://www.rp.atyphoon.ru/upload/medi alibrary/f39/ezhegodnik_ro_2021_.pdf (accessed 12 September 2022).
4. Belousova A.P., Zakharova T.V., Shvets V.M. Monitoring gidrosfery v rayonakh raspolozheniya AES [Hydrosphere monitoring in the areas of the NPP location.] *Vodnye resursy*, 1992, vol. 19, no. 3, pp. 127–134. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32686075> (accessed 12 September 2022).
5. Belousova A.P. Monitoring podzemnykh vod v rayonakh raspolozheniya AES [Monitoring of groundwater in the areas of the NPP location]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2015, no. 4, pp. 65–71. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23251664_54918649.pdf (accessed 12 September 2022).
6. Choudhury T.R., Ferdous J., Haque Md.M., Rahman Md.M., Quraishi S.B., Rahman M.S. Assessment of heavy metals and radionuclides in groundwater and associated human health risk appraisal in the vicinity of Rooppur nuclear power plant, Bangladesh. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2022, vol. 251, pp. 104072.
7. Buraeva E.A. Radioecological monitoring of aquatic ecosystems of the Rostov NPP area. *Globalnaya yadernaya bezopasnost*, 2012, no. S (3), pp. 83–92. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18089088> (accessed 12 September 2022).
8. Ryazanov S.V., Pisarenko E.N., Antonov P.E., Khubetsov A.Yu. Radioekologicheskij monitoring vodnykh ekosistem rayona raspolozheniya Balakovskoy AES [Radioecological monitoring of aquatic ecosystems of the Balakovo NPP location area]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2009, no. 3, pp. 31–34. Available at: <http://envjournal.ru/ari/v2009/v3/09306.pdf> (accessed 12 September 2022).
9. Mikhailova R.A., Kurbakov D.N., Sidorova E.V., Geshel I.V., Andreeva N.V., Sorokin Yu.V., Panov A.V. Comprehensive radioecological monitoring of freshwater ecosystems in the vicinity of Rooppur NPP (People's Republic of Bangladesh). *Marine Biological Journal*, 2020, vol. 5, no. 3, pp. 30–54. In Rus. Available at: https://pdfs.semanticscholar.org/7ab8/bc5e7d25f45f5d118839b5c82e168ae5ad18.pdf?_ga=2.257093579.1107403703.1663140917-63571462.1658920840 (accessed 12 September 2022).
10. Ryazanov S.V., Pisarenko E.N., Antonov P.E., Khubetsov A.Yu. Radioekologicheskij monitoring vodnykh ekosistem rayona

- raspolozheniya Balakovskoy AES [Radioecological monitoring of aquatic ecosystems of the Balakovo NPP location area]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2009, no. 3, pp. 31–34. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12929243_12304055.pdf (accessed 12 September 2022).
11. Voronin M.Yu. Long-term monitoring of macrozoobenthos of the cooling reservoir of the Balakovo NPP. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: khimiya. Biologiya. Ekologiya*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 461–472. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_42316313_82532784.pdf (accessed 12 September 2022).
 12. Marciulioniene D., Montvydiene D. The cooling pond of Ignalina NPP as a model system evaluating effect of radioactive, chemical and thermal pollution to aquatic plants. *8th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2011*. Lithuania, 2011, pp. 111617. Available at: https://www.researchgate.net/publication/266440825_The_cooling_pond_of_Ignalina_NPP_as_a_model_system_evaluating_effect_of_radioactive_chemical_and_thermal_pollution_to_aquatic_plants (accessed 12 September 2022).
 13. Dyachenko T.M., Zub L.N., Tomchenko O.V. Plant cover transformation in the shallow water habitats of the cooling pond of the Chernobyl NPP as a result of its descent. *Hydrobiological Journal*, 2021, no. 57, Iss. 6, pp. 3–16. Available at: <https://www.dl.bejellhouse.com/journals/38cb2223012b73f2.22723b9c5aeea0ca.2791842e75d5426b.html#> (accessed 12 September 2022).
 14. Ragaišis V., Poškas P., Kilda R., Bartkus G. A review of uncertainties in the assessment of the radiological impact of liquid releases to the Ignalina NPP cooling pond lake Drūkšiai. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, vol. 157, pp. 108228. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454921001043?via%3Dihub> (accessed 12 September 2022).
 15. Protasov A., Novoselova T., Uzunov Y., Barinova S., Sylaieva A. Changes in the planktonic system of the nuclear power plant cooling pond related to the invasion of dreissenidae (Mollusca: Bivalvia). *Acta Zoologica Bulgarica*, 2021, vol. 73, Iss. 2, pp. 275–288. Available at: <https://acta-zoologica-bulgarica.eu/2021/002433.pdf> (accessed 12 September 2022).
 16. Querfeld R., Schulz W., Neubohn J., Steinhaus G. Anthropogenic radionuclides in water samples from the Chernobyl exclusion zone. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2018, vol. 318, Iss. 1, pp. 423–428. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10967-018-6030-y> (accessed 12 September 2022).
 17. Kaglyan A.Ye., Gudkov D.I., Kireev S.I., Klenus V.G., Belyaev V.V., Yurchuk L.P., Drozdov V.V., Hupalo O.O. Dynamics of specific activity of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in representatives of ichthyofauna of chernobyl exclusion zone. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 2021, vol. 22, Iss. 1, pp. 62–73. DOI: 10.15407/jnpae2021.01.062
 18. Shynkarenko V.K., Paskevych S.A., Menshenin Y.A., Odintsov O.O. Radionuclides contamination of leaves of woody plants growing within the chnpp cooling pond. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 2021, vol. 22, Iss. 2, pp. 157–166. DOI: 10.15407/jnpae2021.02.157
 19. Kryshev I.I., Bulgakova V.G., Kryshev A.I., Katkova M.N., Sazykina T.G., Pavlova N.N., Kosykh I.V., Gnilomedov V.D., Buryakova A.A., Gaziev I.YA. Radioactivity monitoring of the surface air layer and atmospheric fallout near NPP. *Atomic Energy*, 2019, vol. 126, no. 4, pp. 228–234. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37584549> (accessed 12 September 2022).
 20. Kubo A., Tanabe K., Ito Y., Ishimaru T., Otsuki M., Arakawa H., Watanabe Y.W., Miura H., Tsumune D., Kanda J. Changes in radioactive cesium concentrations from 2011 to 2017 in Fukushima coastal sediments and relative contributions of radioactive cesium-bearing microparticles. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, vol. 161, pp. 111769. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33091633/> (accessed 12 September 2022).
 21. Deng F., Lin F., Yu W., He J., Wang F., Chen Z. The distributions of ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the north west Pacific seawater in the winter of 2012. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, vol. 152, pp. 110900. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32479281/> (accessed 12 September 2022).
 22. Talerko M., Kovalets I., Lev T., Igarashi Y., Romanenko O. Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wildland fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, vol. 12, Iss. 3, pp. 193–204. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104221000210?via%3Dihub> (accessed 12 September 2022).
 23. Takahashi J., Onda Y., Hihara D., Tamura K. Six-year monitoring of the vertical distribution of radiocesium in three forest soils after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, vol. 210, pp. 105811. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29982001/> (accessed 12 September 2022).
 24. Charro E., Pardo R., Pena V. Chemometric interpretation of vertical profiles of radionuclides in soils near a Spanish coal-fired power plant. *Chemosphere*, 2013, no. 90, pp. 488–496. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22967929/> (accessed 12 September 2022).
 25. Ekong G.B., Akpa T.C., Umaru I., Akpaowo M.A., Yusuf S.D., Benson N.U. Baseline radioactivity and associated radiological hazards in soils around a proposed nuclear power plant facility, South-South Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 2021, vol. 182, pp. 104289. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464343X21001904?via%3Dihub> (accessed 12 September 2022).
 26. Kovalyova E.V., Chernikova A.M. Radioecological monitoring of the area near Novovoronezhskaya NPP and its impact on the environment of urbolandshafts. *Vektor GeoNauk*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 54–65. In Rus. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/radioekologicheskiy-monitoring-territorii-vblizii-novovoronezhskoy-aes-i-eyo-vliyanie-na-okruzhayushchuyu-sredunobolandshtov/viewer> (accessed 12 September 2022).
 27. Panov A.V., Trapeznikov A.V., Kuznetsov V.K., Korzhavin A.V., Isamov N.N., Geshel I.V. Radioecological monitoring of agroecosystems in the vicinity of Beloyarsk NPP. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 146–157. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45536801_95408761.pdf (accessed 12 September 2022).
 28. Andreeva N.V., Karpenko E.I., Kuznetsov V.K., Nushtayev S.N. Radio-ecological monitoring of terrestrial ecosystems in the area of the Baltic NPP. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2019, vol. 30, no. 1–2, pp. 105–120. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41271301> (accessed 12 September 2022).
 29. Kuznetsov V.K., Tsygvintsev P.N., Sanzharova N.I., Panov A.V. The analysis of radioecological monitoring results in the vicinity of the Kursk Nuclear power Plant. *Radiation hygiene*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 19–30. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46157964_22774026.pdf (accessed 12 September 2022).
 30. Misonou T., Nakinishi T., Tsuruta T., Shiribiki T., Sanada Y. Migration processes of radioactive cesium in the Fukushima near-shore area: Impacts of riverine input and resuspension. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, no. 178, pp. 113597. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35366555/> (accessed 12 September 2022).
 31. Xu Ch., Zhang S., Sugiyama Y., Ohte N., Ho Yi-F., Nobuhide Fujitake, Kaplan D.I., Yeager Ch.M., Schwehr K., Santschi P.H. Role of natural organic matter on iodine and ²³⁹, ²⁴⁰Pu distribution and mobility in environmental samples from the northwestern Fukushima Prefecture, Japan. *J. Environ. Radioact.*, 2016, vol. 153, pp. 156–166.
 32. *Additional report of the Japanese Government to the IAEA – The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (Second Report)*. Tokyo, Government of Japan, 2011. 45 p. Available at: <https://reliefweb.int/report/japan/report-japanese-government-iaea-ministerial-conference-nuclear-safety-accident-tepcos> (accessed 12 September 2022).
 33. Sources and effects of ionizing radiation. Annex D: health effects due to radiation from the Chernobyl accident. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008)*. New York, 2016. pp. 45–221.
 34. Men Wu. Discharge of contaminated water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident into the North west Pacific: what is known and what needs to be known. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, pp. 112984. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34583249/> (accessed 12 September 2022).

35. Silaev A.L., Chekin G.V., Smolskiy E.V., Novikov A. Current state of soil fertility of radioactively contaminated floodplain ecosystems of the Bryansk region. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*, 2020. no. 6 (82), pp. 10–16. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44346210_64132058.pdf (accessed 12 September 2022).
36. Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Kobtseva M.A., Stasov V.V. Radioecological monitoring of observation zone of the Volgodonsk atomic power station. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 5, pp. 154a–159. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14340752> (accessed 12 September 2022).
37. Panov A.V., Isamov N.N., Kuznetsov V.K. Radiation and environmental monitoring in the Rostov NPP location region. Analysis of the results of long-term research. *Radiatsionnaya gigena*, 2019, vol. 12, no. 2 (spetsvypusk), pp. 54–65. In Rus. Available at: <https://www.radhyg.ru/jour/article/view/629/631> (accessed 12 September 2022).
38. Kononov A.V., Lebedev V.A., Kononov M.A. Effect of the Rostov nuclear power plant on safety of the population of the Rostov region. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta puty soobshcheniya*, 2018, no. 4, pp. 62–65. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36825231_60328042.pdf (accessed 12 September 2022).
39. *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredelnykh gosudarstv v 2020 godu. Ezhгодnik* [Radiation situation on the territory of Russia and neighboring states in 2020. Yearbook]. Obninsk, Nauchno-proizvodstvennoe obединenie «Tayfun» Publ., 2021. Available at: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/187/ezhгодnik_ro_2020.pdf (accessed 12 September 2022).
40. *Opredeleeniye nulevogo fona radioaktivnogo zagryazneniya zemnoy poverkhnosti rayona razmeshcheniya Rostovskoy AES po programme ekologicheskogo monitoringa: ochet* [Determination of the zero background of radioactive contamination of the Earth's surface of the Rostov NPP location area under the environmental monitoring program: Report]. Ed. by M.G. Davydov. Rostov-na-Don, Tsentr radiatsionnoy ekologii i tekhnologii Publ., 2000. 96 p.
41. *GOST R R3091-2008. Kachestvo pochvy. Otkor prob. Ch. 3. Rukovodstvo po bezopasnosti* [State Standart R R3091-2008. Soil quality. Sampling. P. 3. Safety manual]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 20 p.
42. Bodrov I.V., Buraeva E.A., Davydov M.G., Mareskin S.A. Instrumental determination of uranium and thorium in natural objects. *Atomic Energy*, 2004, vol. 96, no. 4, pp. 246–249. In Rus. Available at: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t96-4_2004/go,28/ (accessed 12 September 2022).
43. Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Stasov V.V. Components of the background of Ge(Li) and Ge detectors in passive shielding. *Atomic Energy*, 2007, vol. 103, no. 5, pp. 895–900. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11685546> (accessed 12 September 2022).
44. Larin A.E., Malyshevskiy V.S., Fomin G.V. Altitude and latitudinal distribution of velocity of ⁷Be production in earth atmosphere in «PARMA» model. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2014, vol. 57, no. 6, pp. 88–92. In Rus. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21800559> (accessed 12 September 2022).
45. Bezuglova O.S., Khyrkhyrova M.M. *Pochvy Rostovskoy oblasti* [Soils of the Rostov region]. Rostov n/D, YuFU Publ., 2008. 352 p. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19514324> (accessed 12 September 2022).
46. Noskova L.M., Shuktomova I.I. Radium distribution in anthropogenic soil as a function of soil physicochemical and mineralogical parameters. *Geokhimiya*, 2015, no. 11, pp. 1043–1050. In Rus. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24730277_22802865.pdf (accessed 12 September 2022).
47. Buraeva E.A., Bezuglova O.S., Stasov V.V., Nefedov V.S., Dergacheva E.V., Goncharenko A.A., Martynenko S.V., Goncharova L.Yu., Gorbov S.N., Malyshevskiy V.S., Vardunov T.V. Features of ¹³⁷Cs distribution and dynamics in the main soils of the steppe zone in the southern European Russia. *Geoderma*, 2015, no. 259–260, pp. 259–270. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23973984> (accessed 12 September 2022).
48. Izrael Yu.A., Vakulovskiy S.M., Vetrov V.A., Petrov V.N., Rovinskiy F.Ya., Stukin E.D. *Chernobyl: radioaktivnoe zagryaznenie prirodnykh sred* [Chernobyl: radioactive pollution of natural environments]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 223 p.
49. Razuvaev V.N., Bulygina O.N., Korshunova N.N., Kleshchenko L.K., Kuznetsova V.N., Trofimenko L.T., Sherstyukov A.B., Shvets N.V., Davletshin S.G., Zvereva G.N. *Nauchno-prikladnoy spravochnik «Klimat Rossii»* [Scientific and applied handbook «Climate of Russia»]. 2018. Available at: http://aisori.meteo.ru/clim_sprn (accessed 12 September 2022).

Received: 19 September 2022.

Reviewed: 31 October 2022.

Information about the authors

Elena A. Buraeva, Cand. Sc., associate professor, leading researcher, Southern Federal University.

Dmitry V. Ivankov, postgraduate student, Southern Federal University.

Natalya V. Malomyzheva, research laboratory assistant, Southern Federal University.

Vyacheslav A. Bobylev, research laboratory assistant, Southern Federal University.

Olga S. Bezuglova, Dr. Sc., professor, Southern Federal University.