



^{137}Cs и ^{241}Am на территории Наровлянского района Гомельской области: оценка радиозэкологической обстановки в ситуации существующего облучения

В. Н. Бортновский¹, Е. К. Нилова², С. А. Калиниченко³, С. А. Тагай³

¹ Гомельский государственный медицинский университет, г. Гомель, Беларусь

² Центр по ядерной и радиационной безопасности, г. Минск, Беларусь

³ Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, г. Хойники, Беларусь

Резюме

Цель исследований. Провести оценку содержания ^{137}Cs и ^{241}Am на территории Наровлянского района Гомельской области, прилегающей к Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику.

Материалы и методы. Определение ^{241}Am в продуктах выполнялось радиохимическим методом с альфа-спектрометрической регистрацией. Измерение содержания ^{241}Am в почве, ^{137}Cs в почве и продуктах выполнялось гамма-спектрометрическим методом. Исследование проведено на территории 113 приусадебных участков в 32 пунктах проживания населения Наровлянского района.

Результаты. Удельная активность ^{241}Am в почве приусадебных участков в Наровлянском районе не превышала 10 Бк/кг, ^{137}Cs — варьировала от 230 до 2770 Бк/кг. В пробах продуктов питания содержание ^{241}Am находилось на уровне единиц или десятков миллибеккерелей в 1 кг продукта, ^{137}Cs — в диапазоне 3–160 Бк/кг. Присутствие ^{241}Am в продуктах питания местного производства может обусловить не более 0,1 % в суммарной дозе внутреннего облучения от ^{241}Am и ^{137}Cs , при этом ингаляционный путь поступления ^{241}Am в суммарную дозу внутреннего облучения населения может составлять до 3 %. Посредством перорального пути поступления ^{137}Cs формирует-ся 97–100 % ожидаемой суммарной дозы внутреннего облучения жителей района.

Заключение. На современном этапе постчернобыльского периода, в ситуации существующего облучения доминирует пероральный путь поступления ^{137}Cs с продуктами местного производства, что может обусловить более 97 % суммарной дозы внутреннего облучения жителей Наровлянского района. Учитывая, что вклад ^{241}Am в суммарную дозу внутреннего облучения населения может составлять до 3 %, рекомендовано ограничение работ с наибольшим пылеобразованием на сухой загрязненной радионуклидами почве для сокращения поступления альфа-излучающих радионуклидов путем ингаляции.

Ключевые слова: ^{241}Am , ^{137}Cs , плотность загрязнения почвы, удельная активность, ингаляционное поступление, доза внутреннего облучения

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники финансирования. Исследование выполнено в рамках научного раздела Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2011–2015 гг. и на период до 2020 г.

Для цитирования: Бортновский ВН, Нилова ЕК, Калиниченко СА, Тагай СА. ^{137}Cs и ^{241}Am на территории Наровлянского района Гомельской области: оценка радиозэкологической обстановки в ситуации существующего облучения. Проблемы здоровья и экологии. 2024;22(2):128–136. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2024-21-2-15>

¹³⁷Cs and ²⁴¹Am in Narovlya District of Belarus: Updated Radiological Assessment of the Local Existing Exposure Situation

Vladimir N. Bortnovsky¹, Ekaterina K. Nilova², Sergey A. Kalinichenko³,
Svetlana A. Tagai³

¹ Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

² Center for Nuclear and Radiation Safety, Minsk, Belarus

³ Polesie State Radiation-Ecological Reserve, Khoyniki, Belarus

Abstract

Objective. To provide an assessment of ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am levels in Narovlya district of the Gomel region adjacent to the Polesie State Radiation-Ecological Reserve

Materials and methods. The data on soil and food contamination is obtained for 113 private backyards located in 32 villages of the Narovlya district. A gamma-spectrometry technique was used to measure ²⁴¹Am in soil and ¹³⁷Cs in soil and food samples. ²⁴¹Am in food samples was measured via a radiochemical method with the use of alpha-spectrometry measurement.

Results. The values of specific activity of radionuclides in the soil of all sites range from 230 to 2770 Bq/kg for ¹³⁷Cs and do not exceed 10 Bq/kg for ²⁴¹Am. The specific activities of ¹³⁷Cs in food samples range from 3 to 160 Bq/kg, and the values of ²⁴¹Am concentration stay within units or tens of millibecquerels per 1 kilo of a product. The estimates show that, considering the present-time ²⁴¹Am contamination of locally produced foods, its share in the total internal radiation dose is not likely to be higher than 0.1% from both radionuclides, ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am. However, inhalation of ²⁴¹Am can increase its share in the total internal dose up to 3%. Consumption of ¹³⁷Cs-contaminated foodstuffs may potentially cause 97 to 100% of the total internal radiation dose in the district.

Conclusion. At the present stage of the radioecological context in the existing exposure situation the major contribution to the public internal exposure is ¹³⁷Cs intake through consumption of contaminated food that produced locally; its contribution is more than 97% of the total internal dose received by the Narovlya district residents. It is recommended to minimize any type of fieldworks on the dry and dusty soils that can cause excessive inhalation of the alpha-emitting ²⁴¹Am.

Keywords: Caesium-137, Americium-241, deposition density, specific activity, inhalation, internal exposure

Author contributions. All the authors made a significant contribution to the search and analytical work and preparation of the article, read and approved the final version before publication.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study was performed in the framework of the scientific support section of the State Programme on Overcoming the Consequences of the Chernobyl NPP Accident for 2011-2015 and until 2020.

For citation: Bortnovsky VN, Nilova EK, Kalinichenko SA, Tagai SA. ¹³⁷Cs and ²⁴¹Am in Narovlya District of Belarus: Updated Radiological Assessment of the Local Existing Exposure Situation. *Health and Ecology Issues*. 2024;22(2):128–136. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2024-21-2-15>

Введение

Последствия катастрофы на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) для Беларуси были определены как «национальное экологическое бедствие», поскольку около 35 % всех чернобыльских выпадений долгоживущего радиоактивного цезия на Европейском континенте оказались на территории республики [1, 2]. В той или иной мере загрязнению подверглись территории двух десятков европейских государств, площадь загрязнения составила более 200 тыс. км², из них около 140 тыс. км² приходится на территории Республики Беларусь, Российской Федерации и Украины [3]. В качестве критерия для отнесения территории к зоне радиоактивного загрязнения законодательством ряда стран принято значение величины плотности загрязнения ¹³⁷Cs — 1 Ки/км² (37 кБк/м²), что примерно

в 10 раз выше значений, обусловленных глобальными радиоактивными выпадениями от испытаний ядерного оружия [4]. ¹³⁷Cs (T_{1/2} = 30 лет) был выбран в качестве реперного радионуклида в силу ряда причин: изотоп является как долгоживущим, так и источником пожизненной эффективной дозы, его содержание относительно легко поддается измерению с применением современных средств измерения. С распадом ¹³⁷Cs площадь территории, определенной как загрязненная, постепенно уменьшается, в частности, в Беларуси — с 23 % в 1986 г. до 16 % в 2016 г. и 10 % в 2046 г. [5].

Три юго-восточных района Беларуси (Брагинский, Хойникский и Наровлянский) непосредственно граничат с наиболее загрязненными землями — Полесским государственным радиационно-экологическим заповедником (ПГРЭЗ),

который включает белорусский сектор зон отчуждения и отселения ЧАЭС. На данной территории также сосредоточены и основные загрязнения трансурановыми элементами — $^{238,239,240,241}\text{Pu}$ и ^{241}Am . ^{241}Pu при распаде является мягким β -излучателем (максимальная энергия его β -частиц невелика — 20,8 кэВ) [6], однако продуктом его распада является ^{241}Am , количество которого увеличивается со временем. Максимальная общая активность ^{241}Am в окружающей среде ожидается к 2058 году и будет составлять 0,077 ПБк [5], что значительно ниже начального количества выброса в атмосферу ^{241}Pu (2,6 ПБк), но более чем вдвое выше активности изотопов плутония ($^{238+239+240}\text{Pu}$).

На этапе ситуации существующего облучения, принимая во внимание рост ^{241}Am , актуальным является уточнение содержания данного радионуклида относительно ^{137}Cs в почве, пищевых продуктах и оценка вклада каждого из радиоизотопов в дозы облучения населения. Авария на ЧАЭС признана «сельской аварией», поскольку основной контингент населения в зоне аварии — это люди, проживающие в сельской местности и имеющие «сельский» тип питания, что определяет более высокие дозы облучения последних по сравнению с горожанами [7]. Настоящая статья посвящена части комплекса исследований в южной зоне Гомельской области Беларуси, непосредственно прилегающей к ПГРЭЗ [8], и содержит результаты, характеризующие радиационную обстановку в Наровлянском районе.

Цель исследования

Провести оценку содержания ^{137}Cs и ^{241}Am на территории Наровлянского района Гомельской области, прилегающей к Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику.

Материалы и методы

На участках личного подсобного хозяйства 32 населенных пунктов (н. п.) Наровлянского района Гомельской области в 2019 г. выполнен отбор проб почвы и продуктов питания местного производства (таблицы 1, 2). Почва отбиралась на территории 113 частных подворий на глубине пахотного горизонта 20 см, образцы продуктов питания местного производства — на 6 частных подворьях, в которых были отмечены наибольшие значения удельных активностей радионуклидов в почве. Принимая во внимание результаты опроса жителей района, были отобраны образцы следующих пищевых продуктов: рыба свежая (одна проба из реки Припять), грибы сырые (одна проба), грибы сухие (одна проба) — для последующего определения в них ^{137}Cs и ^{241}Am . Описание процедуры отбора, подготовки

и измерения содержания радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am в почвенных образцах, ^{137}Cs в образцах продуктов методом гамма-спектрометрии и ^{241}Am в продуктах методом радиохимической очистки с альфа-спектрометрической регистрацией приведено в предыдущих публикациях данного цикла исследований [8]. Отметим, что в подготовке проб применялся консервативный подход: определение радионуклидов проводилось в отмытых клубне- и корнеплодах без удаления кожуры — «в мундире», а листовую зелень для аналитического процесса брали после срезки, без предварительной обработки водой.

Результаты и обсуждение

Радиологические характеристики почвы — мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД) на высоте 1 м от поверхности почвы, удельная активность (на воздушно-сухую массу), плотность загрязнения ^{137}Cs , а также расстояние до ЧАЭС представлены в таблице 1. Учитывая статус пункта проживания населения, в районном центре — г. Наровле было отобрано максимальное количество проб почвы — на 18 подворьях.

Результаты показали, что изменение содержания ^{137}Cs в почве приусадебных участков г. Наровли варьировало до пяти раз — в диапазоне от 500 до 2500 Бк/кг, максимальная плотность загрязнения ^{137}Cs почвы составляла 537 кБк/м². Агророгодки (а. г.) Киров и Вербовичи, г. Наровля, непосредственно граничащие с ПГРЭЗ, а также н. п. Лубень, Дзержинск и Конотоп характеризовались самыми высокими уровнями загрязнения ^{137}Cs в Наровлянском районе (таблица 1). Максимальная удельная активность ^{137}Cs в почве — свыше 2700 Бк/кг отмечена в а. г. Киров (проживает более 300 жителей) и н. п. Лубень (проживает 1 чел.). Только на один из 18 обследованных подворий в г. Наровле было отмечено содержание ^{241}Am (3,6 Бк/кг) в почве выше нижней границы диапазона измерений — превышало пределы обнаружения гамма-спектрометрического метода определений > 1 Бк/кг. Всего из 113 проб почвы, отобранных на территории всех частных подворий в 32 населенных пунктах Наровлянского района, содержание ^{241}Am превышало пределы обнаружения в 37 пробах (или в 30 % отобранных проб). В а. г. Киров в 10 из 12 отобранных проб почвы было установлено измеримое содержание ^{241}Am . Все полученные значения содержания ^{241}Am в почве а. г. Киров находились в диапазоне 1,5–4,6 Бк/кг и с учетом погрешности измерений не превышали 10 Бк/кг (рисунок 1). В а. г. Буда-Головчицкая из девяти проб почвы измеримое на гамма-спектрометре содержание ^{241}Am = 8,9 Бк/кг установлено в од-

ной пробе, при этом данный уровень был максимальным для всех проб района. Самые южные, наименее удаленные от ЧАЭС пункты, такие как Братское, Красновка, Буда-Красновская, Габрилеевка, Александровка, характеризовались относительно низким содержанием ^{137}Cs в почве, которое не превышало 500 Бк/кг (таблица 1). Показатели МАЭД на приусадебных участках в

Наровлянском районе коррелировали со значениями плотности загрязнения почвы ^{137}Cs и находились в пределах от 0,06 до 0,43 мкЗв/ч при среднем значении 0,19 мкЗв/ч. Аналогичный диапазон МАЭД был установлен и на частных подворьях в других районах Гомельской области, прилегающих к белорусскому сектору зоны отселения Чернобыльской АЭС [8].

Таблица 1. Содержание ^{137}Cs в почве подворий населенных пунктов Наровлянского района Гомельской области, обследованных в 2019 г.

Table 1. ^{137}Cs content in the soil of the farmlands of the Narovlya district villages examined in the Gomel region in 2019

Населенный пункт	Количество проб	МАЭД		^{137}Cs				Расстояние до ЧАЭС, км
		сред.	макс.	Асред.		Амакс.		
				мкЗв/ч	Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	
1. Наровля	18	0,23	0,40	1303	290	2535	537	61
2. Киров	12	0,29	0,42	2028	480	2771	630	48
3. Буда-Головчицкая	9	0,1	0,14	546	119	946	213	68
4. Вербовичи	8	0,23	0,35	1309	267	2108	430	54
5. Дзержинск	5	0,20	0,28	1249	290	2240	508	53
6. Конотоп	4	0,20	0,26	1320	272	2020	406	55
7. Демидов	4	0,14	0,15	665	175	972	266	65
8. Гажин	4	0,16	0,26	886	214	1465	320	68
9. Красновка	3	0,08	0,11	390	89	566	127	52
10. Линов	3	0,09	0,11	501	94	632	125	71
11. Головчицы	3	0,21	0,22	1250	261	1170	245	64
12. Будки	3	0,13	0,15	779	169	945	207	69
13. Физинки	3	0,18	0,23	966	187	1265	245	60
14. Грушевка	3	0,19	0,2	1248	297	1355	304	56
15. Антонов	3	0,19	0,24	1132	240	1642	274	57
16. Завойть	3	0,12	0,14	707	113	977	149	67
17. Александровка	2	0,07	0,08	230	76	281	59	42
18. Габрилеевка	2	0,06	0,06	303	68	321	79	46
19. Свеча	2	0,12	0,13	682	155	720	173	67
20. Москалевка	2	0,16	0,19	584	147	985	124	57
21. Чехи	2	0,19	0,2	1106	239	1353	264	63
22. Гридни	2	0,26	0,28	1595	282	1860	339	53
23. Калиничи	2	0,19	0,19	1164	243	1274	255	63
24. Буда-Красновская	2	0,08	0,08	435	108	465	111	52
25. Червонный остров	2	0,25	0,28	1503	330	1798	399	66
26. Братское	1	0,09	—	395	77	—	—	45
27. Мальцы	1	0,14	—	628	147	—	—	64
28. Лубень	1	0,43	—	2758	631	—	—	58
29. Красный Луч	1	0,22	—	1100	265	—	—	67
30. Победа	1	0,10	—	828	142	—	—	71
31. Гута	1	0,21	—	1344	384	—	—	66
32. Заракитное	1	0,13	—	721	168	—	—	67

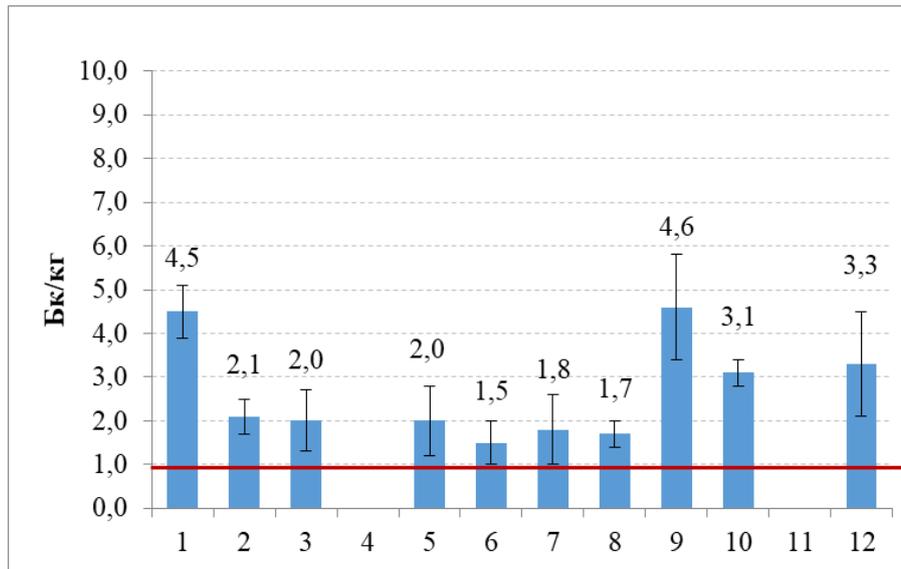


Рисунок 1. Распределение удельной активности ^{241}Am в образцах почвы, отобранных в а. г. Киров Наровлянского района Гомельской области

Figure 1. Distribution of specific activity of ^{241}Am in the samples taken in agrotown Kirov, Narovlya district of Gomel region

В работе российских исследователей представлены результаты измерений МАЭД и плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в 2020–2021 гг. на огородных участках, расположенных в зоне радиоактивного загрязнения ЧАЭС Брянской области [9]. Мощность эффективной дозы от природных радионуклидов в населенных пунктах загрязненных районов Брянской области оценена как средняя величина — 35 нЗв/ч. Данная оценка может являться важным дополнением для анализа значений МАЭД, установленных в наших исследованиях, поскольку тип почвы приграничных районов Республики Беларусь и Российской Федерации имеет схожие характеристики: с преобладанием дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв. В настоящее время уровни МАЭД, установленные в большинстве населенных пунктов Наровлянского района, подтверждают доминирование чернобыльской компоненты от радиоактивного цезия в суммарной мощности дозы гамма-излучения на частных подворьях. Кроме того, внешнее облучение от присутствия ^{241}Am в почве, обусловленное низкоэнергетическими γ -квантами ($E_\gamma = 59,6$ кэВ), всегда нивелируется на фоне значительно более высоких показателей активности ^{137}Cs ($E_\gamma = 661,7$ кэВ).

Продукты питания отбирались только на тех приусадебных участках, где были установлены максимальные уровни содержания ^{241}Am в почве (таблица 2). В а. г. Киров, расположенном ближе к ЧАЭС (таблица 1), пробы продуктов отбирались на трех участках — № 1, 9, 12 (рисунок 1).

Максимальная удельная активность ^{241}Am (97,2 мБк/кг) в продуктах питания на приусадебных участках в Наровлянском районе установлена в пробах листовой зелени петрушки. В пробах картофеля, свеклы, лука на перо содержание ^{241}Am находилось в пределах 2–11 мБк/кг. При этом содержание ^{137}Cs в пробах данной растительной продукции (таблица 2) установлено в диапазоне 3–160 беккерелей на 1 кг натурального продукта, что на 3–4 порядка величины превышает содержание ^{241}Am . В сухих грибах вблизи а. г. Вербовичи уровень ^{241}Am составлял 20,5 мБк/кг на фоне содержания ^{137}Cs — 16,5 кБк/кг, что указывает на преобладание цезия до 6 порядков величины в сухих грибах по сравнению с америцием. В сырых грибах вблизи а. г. Киров установлено аналогичное изотопное соотношение $^{137}\text{Cs} / ^{241}\text{Am}$ с преобладанием цезия в продукте на 5 порядков величины относительно америция. В единичной пробе рыбы (тушка с головой) из реки Припять не установлено содержание ^{241}Am , превышающее предел обнаружения 1 мБк/кг применяемых методик анализа.

Рассмотрение полученных результатов (таблица 2) на соответствие техническим нормативным правовым актам Республики Беларусь, устанавливающим требования по содержанию радионуклидов в пищевых продуктах, показывает, что основное количество продуктов из частного сектора в Наровлянском районе соответствует допустимым уровням по содержанию ^{137}Cs .

Таблица 2. Содержание ^{241}Am и ^{137}Cs в продуктах питания из частных подворий в Наровлянском районе Гомельской областиTable 2. ^{241}Am and ^{137}Cs contents in the foodstuffs from the backyards in Narovlya district of Gomel region

Населенный пункт	Продукт	$^{137}\text{Cs}^*$ Бк/кг	$^{241}\text{Am}^*$ мБк/кг	^{137}Cs КН**	^{241}Am КН**
г. Наровля	Картофель	19,2±2,5	3,2±1,3	0,0151	0,0009
	Лук-перо	15,8±2,2	2,2±0,8	0,0120	0,0006
	Петрушка	12,5±2,8	2,1±0,8	0,0099	0,0006
а. г. Киров — № 1	Картофель	14,0±2,1	3,6±1,3	0,0069	0,0008
	Свекла	3,8±1,1	4,3±1,4	0,0019	0,0010
	Лук-перо	4,6±1,3	3,3±1,2	0,0023	0,0007
а. г. Киров — № 9	Картофель	5,4±1,3	4,5±1,3	0,0019	0,0010
	Картофель	8,5±1,6	8,6±1,7	0,0035	0,0028
	Лук-перо	59,6±8,3	7,8±1,8	0,0285	0,0024
а. г. Киров — № 12	Петрушка	158±20	97,2±22,0	0,0755	0,0295
	Грибы сырые	4168±526	9,9±2,1	—	—
	Яйцо куриное	20,4±2,6	—	—	—
а. г. Вербовичи	Картофель	3,2±1,1	4,5±1,2	0,0016	0,0009
	Свекла	4,0±0,6	4,4±1,2	0,0020	0,0009
	Лук-перо	6,5±1,4	2,8±0,8	0,0045	0,0015
	Грибы сухие	16537±2084	20,5±4,2	—	—
д. Буда-Головчицкая	Картофель	6,2±0,9	1,8±0,4	0,0082	0,0002
	Лук-перо	2,8±1,1	10,7±2,1	0,0037	0,0012
р. Припять	Рыба свежая	16,2±2,0	<1,0	—	—

*Удельная активность ± погрешность определения радионуклидов в продуктах определена на натуральную массу.

**Коэффициент накопления или концентрационное отношение (КН). Отношение активности радионуклида в единице сухого веса растений Бк-кг-1 к активности в сухой почве Бк-кг-1. Безразмерный параметр

Все пробы картофеля с большим запасом не превышают референтный уровень (80 Бк/кг), а большинство образцов, включая яйцо куриное и рыбу из реки Припять, проходят в том числе норматив продуктов детского питания для употребления в готовом виде — 40 Бк/кг. Исключение составляет проба листовой зелени петрушки из а. г. Киров, где содержание ^{137}Cs (158 Бк/кг) превышает норматив для овощей — 80 Бк/кг.

Принимая во внимание условия отбора проб зелени для анализа (без дополнительной обработки водой), следует предположить, что в цезиевом загрязнении такой пробы присутствует не только корневое поступление радионуклида, но и пылевое загрязнение листовой поверхности. Известно, что коэффициент накопления (КН) ра-

дионуклидов в культурных растениях в 10–100 раз больше, чем дикорастущих, поскольку выполнение операций по возделыванию культур сопровождается интенсивным пылеобразованием и поступлением радионуклидов на листовую поверхность растений [10, 11]. В работе [12] показано, что листья салата-латука (*Lactuca sativa* L.) задерживают частицы почвы до 260 г/кг. Это позволяет считать поверхностный путь загрязнения радионуклидами доминирующим по сравнению с корневым путем во всех случаях, когда КН радионуклида в листьях к содержанию в почве меньше или равен 0,1 (таблица 2). Надлежащее соблюдение гигиенических требований перед употреблением в пищу тщательно отмывать овощи, выращенные на территории радиоактивного

загрязнения, позволит обеспечить дополнительное снижение содержания радионуклидов в продукции.

Содержание ^{137}Cs в пробах грибов (таблица 2), полученных из продуктовых запасов жителей Наровлянского района, многократно превышает предельные нормативные значения — 500 Бк/кг для сырых и 2500 Бк/кг для сухих грибов. Результаты подтверждают, что именно компонента дикорастущих грибов может значительно превышать поступление ^{137}Cs в рацион жителей по сравнению с другими продуктами. Использование всех этапов кулинарной обработки сушеных грибов (мытья, замачивания и варки) приводит к снижению содержания ^{137}Cs в грибном бульоне на 75 % [13].

Установленные удельные активности ^{241}Am в пробах продуктов из частных подворий в Наровлянском районе, как и в предыдущих результатах [8], находятся на уровне единиц или десятков миллибеккерелей в 1 кг продукта. Эти данные использованы для оценки вклада ^{241}Am в дозу внутреннего облучения населения. Содержание ^{241}Am в сельскохозяйственных культурах, как и изотопов плутония $^{239+240}\text{Pu}$, не регламентируется нормативными документами Республики Беларусь.

Оценка вклада ^{137}Cs и ^{241}Am в дозы внутреннего облучения населения, проживающего в частном секторе Наровлянского района, выполнена на основании всех фактических данных об уровнях загрязнения почвы и продуктов питания (таблицы 1, 2), получаемых жителями на личном подворье, в соответствии с международными документами [14–16]. В расчетах оценки ожидаемой дозы внутреннего облучения от поступающих по пищевой цепочке радионуклидов консервативно принималось, что все основные компоненты рациона: картофель, зелень, овощи, фрукты и ягоды, молоко, мясо, яйца — население получает на личном подворье, при этом учитывались полученные экспериментальным путем наибольшие коэффициенты накопления радионуклидов в продуктах питания (таблица 2), характеризующие рассматриваемый регион. При отсутствии данных о содержании радионуклидов в продукте ввиду низких активностей использовались расчетные данные с учетом максимальных концентрационных соотношений в соответствии с международным справочником [16]. Для оценки ингаляционного пути поступления контролируемых радионуклидов использованы коэффициенты ресуспензии [17], характеризующие влияние сельскохозяйственных операций на загрязнение приземного слоя воздуха при выполнении полевых работ. Расчеты ингаляционной оценки вы-

полнялись для возрастной группы «взрослые». Время облучения условно считалось равным времени выполнения полевых работ и принималось на основе опроса населения. Расчет ожидаемой годовой дозы внутреннего облучения при поступлении радионуклидов с воздухом проведен с учетом предположения, что жители выполняют пылеобразующие сельскохозяйственные работы на участке 4 ч в день (2 ч утром, 2 ч вечером — согласно опросам) в течение семи месяцев.

Результаты оценки ожидаемых доз внутреннего облучения жителей Наровлянского района свидетельствуют, что в случае присутствия на приусадебном участке в составе радиоактивного загрязнения зарегистрированных количеств ^{241}Am выполнение сельскохозяйственных работ может обусловить ингаляционную компоненту эффективной дозы облучения, которая находится в пределах 0,002–0,018 мЗв/год и всегда превышает аналогичную дозу от ингаляции ^{137}Cs более чем в 10 раз. При этом пероральная компонента эффективной дозы облучения от ^{241}Am при потреблении продуктов питания из личных подсобных хозяйств по всему Наровлянскому району не превышает 0,0005 мЗв/год и всегда на порядок величины меньше ингаляционной компоненты дозы от америция.

Структура ожидаемой дозы внутреннего облучения населения Наровлянского района от поступления ^{137}Cs и ^{241}Am диаметрально отличаются. Пероральная компонента дозы от цезия, формируемая при потреблении местных продуктов, всегда преобладает и составляет 99,8–100 % в суммарной дозе внутреннего облучения от ^{137}Cs . Максимальная ожидаемая доза внутреннего облучения от ^{137}Cs по Наровлянскому району отмечена в а. г. Киров, н. п. Лубень и составляет 1,7 мЗв/год, что является сопоставимым со средними значениями указанной величины, установленными для данных населенных пунктов согласно Каталогу средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь¹ — 0,98 и 1,16 мЗв/год соответственно. Всего в восьми из 32 обследованных населенных пунктов района, т. е. в каждом четвертом пункте проживания населения ожидаемая доза внутреннего облучения от ^{137}Cs может превышать 1 мЗв/год. Если рассмотреть суммарную дозу внутреннего облучения от ^{137}Cs и ^{241}Am в целом, то и здесь доминирует пероральный путь поступления ^{137}Cs с продуктами питания, что может обусловить 97–100 % ожидаемой суммарной дозы внутреннего облучения жителей района. Наблюдаемые же уровни присутствия ^{241}Am в продуктах питания местного

1. Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения Республики Беларусь. Утвержден Министерством здравоохранения Республики Беларусь 10.04.2020 г. Минск, 2020

производства, которые население получает на своих приусадебных участках, могут привести не более 0,1 % в дозу внутреннего облучения от суммы радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs . Доза внутреннего облучения от ингаляционного поступления ^{241}Am при выполнении полевых работ на участках в населенных пунктах Наровлянского района может составлять до 3 % в суммарную дозу внутреннего облучения от суммы радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am .

Заключение

Результаты исследования показали, что присутствие установленных количеств ^{241}Am в продуктах питания в Наровлянском районе может обусловить не более 0,1 % в суммарной дозе вну-

треннего облучения от суммы ^{241}Am и ^{137}Cs , тогда как ингаляционный путь поступления америция может привносить до 3 % в суммарную дозу внутреннего облучения населения при выполнении ими полевых работ. Ожидаемая доза внутреннего облучения от ^{137}Cs может превышать 1 мЗв/год для жителей 8 населенных пунктов района из 32 обследованных. Пероральный путь поступления ^{137}Cs может обусловить 97–100 % ожидаемой суммарной дозы внутреннего облучения жителей района. При этом ограничение полевых работ на сухой почве с наибольшим пылеобразованием является обоснованным дополнительным резервом для сокращения поступления альфа-излучающих радионуклидов путем ингаляции в организм жителей.

Список литературы / References

1. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь). Под ред. Ю.А. Изразля и И.М. Богдевича. Москва-Минск: Фонд «Инфосфера»; НИА-Природа, 2009.
2. Atlas of current and future effects of the Chernobyl accident on affected parts of the Russian Federation and Belarus (ACFE Russia-Belarus). Eds.: Israel YuA, Bogdevich IM. Moscow-Minsk: Foundation «Infosfera», NIA Priroda; 2009. (In Russ.).
3. 35 лет после чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий: национальный доклад Республики Беларусь. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Минск: ИВЦ Минфина, 2020.
- 35 years after the Chernobyl disaster: results and prospects of overcoming its consequences: national report of the Republic of Belarus. Department for elimination of consequences of the Chernobyl disaster of the Ministry of emergency situations of the Republic of Belarus. Minsk: IVC Minfina; 2020. (In Russ.).
3. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. Радиологические последствия и уроки радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1». *Радиационная гигиена*. 2021;14(1):6-16.
DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-6-16>
- Onischenko GG, Popova AY, Romanovich IK. Radiological consequences and lessons of the Chernobyl NPP and "Fukushima-1" NPP radiation accidents. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1):6-16. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-6-16>
4. Радиэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий. Под ред. Н.И. Санжаровой, С.В. Фесенко. Москва: РАН; 2018.
- Radioecological consequences of the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident: Biological Effects, Migration, Rehabilitation of contaminated territories. Ed. N.I. Sanzharova, S.V. Fesenko. Moscow: RAN; 2018. (In Russ.).
5. UNSCEAR 2008. Effects of Ionizing Radiation. Volume II: Report to the General Assembly, Scientific Annexes C, D and E. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations; 2011.
DOI: <https://doi.org/10.18356/ce8f288a-en>
6. Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика. Лаборатория знаний. Москва; 2006.
- Sapozhnikov YuA, Aliev RA, Kalmykov SN. Radioactivity of the environment. *Theory and Practice*. Laboratoriya Znaniy. Moscow; 2006. (In Russ.).
7. Алексахин Р.М., Санжарова Н.И., Фесенко С.В. Радиэкология и авария на Чернобыльской АЭС. *Атомная энергия*. 2006;100(4):267-276.
- Aleksaxin RM, Sanzharova NI, Fesenko SV. Radioecology and the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2006;100(4):267-276. (In Russ.).
8. Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., Дударева Н.В., Жукова Л.В. ^{241}Am на территориях, прилегающих к белорусскому сектору зоны отселения Чернобыльской АЭС: загрязнение почв, продуктов питания и оценка доз внутреннего облучения населения. *Радиационная гигиена*. 2019;12(2 (специальный выпуск)):75-82.
DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2s-75-82>
- Nilova EK, Bortnovsky EV, Tagai SA, Dudareva NV, Zhukova LV. ^{241}Am on the territories adjacent to the Belarusian sector of the Chernobyl NPP resettlement zone: soil contamination, foodstuffs and population internal dose assessment. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12 (2 (special issue)):75-82. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2s-75-82>
9. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Мощность AMBIENTного эквивалента дозы и плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах в населенных пунктах Брянской области России в 2020–2021 гг. *Радиационная гигиена*. 2021;14(4):85-95.
DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-4-85-95>
- Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Ambient dose equivalent rate and soil contamination density with ^{137}Cs in kitchen gardens in settlements of the Bryansk region, Russia in 2020–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4):85-95. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-4-85-95>
10. Bunzl K, Kracke W. Soil to plant transfer of $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{137}Cs and ^{90}Sr from global fallout in flour and bran from wheat, rye, barley and oats, as obtained by field measurements. *Science of the Total Environment*. 1987; 63(C):111-124.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(87\)90040-4](https://doi.org/10.1016/0048-9697(87)90040-4)
11. Popplewell DS, Ham GJ, Johnson TE, Stather JW, Sumner SA. The uptake of plutonium-238, 239, 240, americium-241, strontium-90 and caesium-137 into potatoes. *Science of the Total Environment*. 1984;38(C):173-181.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(84\)90215-8](https://doi.org/10.1016/0048-9697(84)90215-8)
12. Pinder JE, McLeod KW. Contaminant transport in agroecosystems through retention of soil particles on plant surfaces.

Journal of Environmental Quality. 1988;17:602-607.

DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq1988.00472425001700040014x>

13. Варфоломеева К.В. Кулинарная обработка сушеных грибов как эффективный способ снижения содержания в них цезия-137. *Радиационная гигиена*. 2019;12(4):82–88.

DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426x-2019-12-4-82-88>

Varfolomeeva KV. Cooking of the dried mushrooms as an effective solution for the reduction of the ¹³⁷Cs concentration. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4):82-88. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426x-2019-12-4-82-88>

14. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Generic Procedures for Assessment and Response During a Radiological Emergency, IAEA-TECDOC-1162, IAEA, Vienna (2000).

15. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014).

DOI: <https://doi.org/10.61092/iaea.u2pu-60vm>

16. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Technical Reports Series No. 472, IAEA, Vienna (2010).

17. Podolyak A, Tagai S, Nilova E, Averin V. Assessment of committed doses received by agricultural workers in grain harvesting operations in the areas of radioactive contamination. *Radioprotection*. 2017;52(1):37-43.

DOI: <https://doi.org/10.1051/radiopro/2017001>

Информация об авторах / Information about the authors

Бортновский Владимир Николаевич, к.м.н., доцент, заведующий кафедрой экологической и профилактической медицины, УО «Гомельский государственный медицинский университет», Гомель, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9279-3698>

e-mail: kafog2@mail.ru

Нилова Екатерина Константиновна, к.б.н., заведующий отделом по радиационной безопасности, ГНТУ «Центр по ядерной и радиационной безопасности» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9221-269X>

e-mail: k_nilova@mail.ru

Калиниченко Сергей Александрович, к.б.н., доцент, заведующий отделом спектрометрии и радиохимии, ГПНИУ «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник» Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, Хойники, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4227-2832>

e-mail: s-a-k@list.ru

Тагай Светлана Алексеевна, старший научный сотрудник, ГПНИУ «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник» Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, Хойники, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8387-1095>

e-mail: lanabuz@tut.by

Vladimir N. Bortnovsky, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Ecology and Prophylactic Medicine, Gomel State Medical University, Gomel, Belarus.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9279-3698>

e-mail: kafog2@mail.ru

Ekaterina K. Nilova, Candidate of Biological Sciences, Head of the Department of Radiation Safety, Center for Nuclear and Radiation Safety of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9221-269X>

e-mail: k_nilova@mail.ru

Sergey A. Kalinichenko, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Spectrometry and Radiochemistry, Polesie State Radiation-Ecological Reserve, Khoyniki, Belarus.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4227-2832>

e-mail: s-a-k@list.ru

Svetlana A. Tagai, Senior Researcher, Polesie State Radiation-Ecological Reserve, Khoyniki, Belarus.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8387-1095>

e-mail: lanabuz@tut.by

Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Бортновский Владимир Николаевич

e-mail: kafog2@mail.ru

Vladimir N. Bortnovsky

e-mail: kafog2@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 05.04.2024

Поступила после рецензирования / Accepted 23.05.2024

Принята к публикации / Revised 05.06.2024