

Оценка современных уровней ^{241}Am и ^{137}Cs в почве, продуктах питания, доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов, прилегающих к зоне отселения Чернобыльской АЭС (на примере Брагинского района Гомельской области Беларуси)

Е.К. Нилова ¹, В.Н. Бортновский ², С.А. Тагай ³, Н.В. Дударева ³, А.Н. Никитин ³

¹ Центр по ядерной и радиационной безопасности, Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Беларусь

² Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

³ Институт радиобиологии, Национальная академия наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Статья является составной частью цикла исследований по сравнительной оценке современных уровней содержания ^{241}Am и ^{137}Cs в почве и продуктах питания местного производства, а также доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов, прилегающих к зоне отселения Чернобыльской АЭС. Целью исследований настоящей работы явилась консервативная оценка ожидаемой годовой дозы внутреннего облучения от ^{241}Am и ^{137}Cs , поступающих в организм с вдыхаемым воздухом и продуктами питания местного производства для жителей частных подворий на примере Брагинского района Гомельской области Беларуси. Фактические данные о современных уровнях содержания радионуклидов в почве были получены для 28 населенных пунктов района, в 2 пунктах с максимальными значениями удельной активности ^{241}Am в почве выполнен отбор и анализ содержания радионуклидов в продуктах питания. Определение ^{241}Am в продуктах выполнялось радиохимическим методом с использованием селективных экстракционно-хроматографических смол и альфа-спектрометрического измерения. Определение ^{241}Am в почве и ^{137}Cs в почве и продуктах выполнялось гамма-спектрометрическим методом. В административном центре района – городском поселке (г.п.) Брагин отмечены наибольшие уровни загрязнения ^{241}Am и ^{137}Cs почвы – до 2,8 и 560 кБк/м² соответственно. Удельная активность ^{241}Am в пробах корне- и клубнеплодов находилась на уровне единиц мБк/кг, а в пробах листовой зелени достигала десятков мБк/кг, при этом содержание ^{241}Am в продуктах было на три порядка величины ниже относительно ^{137}Cs . Результаты оценки показали, что структура ожидаемых доз внутреннего облучения за счет поступления ^{241}Am и ^{137}Cs существенно различается. Максимальная ожидаемая суммарная доза внутреннего облучения ^{137}Cs установлена для жителей Брагина – 1,7 мЗв/год, ^{241}Am – не превышает 0,03 мЗв/год. Максимальные дозы в населенных пунктах района от ингаляционного поступления ^{241}Am варьируют в пределах 0,006–0,033 мЗв/год и превышают на порядок величины дозы от ингаляционного поступления сопутствующего ^{137}Cs (0,0002–0,002 мЗв/год). На современном этапе радиоэкологических последствий катастрофы на ЧАЭС доминирует пероральный путь поступления ^{137}Cs , который может обусловить 93–99% суммарной дозы внутреннего облучения жителей Брагинского района.

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

Введение

Катастрофа на Чернобыльской АЭС привела к загрязнению долгоживущими техногенными радионуклидами обширных территорий Европы. Данное загрязнение имеет сложное пространственное распределение [1]. Около 35% чернобыльских выпадений долгоживущего ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30$ лет) пришлось на территорию Республики Беларусь, что обусловило радиоактивное загрязнение 23% ее террито-

рии с уровнями более 37 кБк/м² (1 Ки/км²) [2, 3]. Из 5 административных областей Беларуси самой пострадавшей оказалась Гомельская область, 70% территории которой подверглось радиоактивному загрязнению. По состоянию на начало 2020 г. в зонах радиоактивного загрязнения Республики Беларусь находится 2166 населенных пунктов, из которых 1132 расположены в Гомельской области [4]. В трех южных районах области – Брагинском, Хойникском

Тагай Светлана Алексеевна

Институт радиобиологии

Адрес для переписки: 246000, Беларусь, Гомель, ул. Федюнинского, д. 16; E-mail: lanabuz@tut.by

и Наровлянском в составе радиоактивного загрязнения присутствуют также и заметные активности долгоживущих изотопов трансурановых элементов (ТУЭ) – $^{238,239,240,241}\text{Pu}$ и ^{241}Am . В современный период площади радиоактивного загрязнения радиоактивным цезием чернобыльского происхождения с уровнем загрязнения выше, чем 37 кБк/м^2 , уменьшились почти в 2 раза ввиду снижения уровня загрязнения почв ^{137}Cs , убыль которого за счет его радиоактивного распада составляет 2,3% в год.

^{241}Am ($T_{1/2} = 432,2$ лет) является единственным радионуклидом из состава чернобыльских радиоактивных выпадений, содержание которого в окружающей среде продолжает возрастать ввиду распада ^{241}Pu ($T_{1/2} = 14,3$ лет). К настоящему моменту времени, то есть более чем за два периода полураспада β -излучающего изотопа ^{241}Pu , большая его часть уже превратилась в ^{241}Am . По оценкам доклада Генассамблеи Научного комитета ООН по действию атомной радиации (*UNSCEAR 2008*), начальная активность ^{241}Pu в составе выбросов ЧАЭС составляла 2,6 ПБк, а максимальная общая активность ^{241}Am в окружающей среде ожидается в 2058 г. и будет составлять 0,077 ПБк, что в 2 раза превысит количество ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{240}Pu вместе взятых в это же время [5]. В обзорной работе Конопки Е.Ф., Кудряшова В.П. и Миронова В.П. [6] показано, что уже в 2005 г. вклад ^{241}Am в общую активность α -излучающих ТУЭ превысил 50%.

Лидирующая роль ^{241}Am в составе современного чернобыльского загрязнения α -излучающими ТУЭ и продолжительный период полураспада ^{241}Am с испусканием высокоэнергетических α -частиц ($E_{\alpha} = 5485,6 \text{ кэВ}$, $5442,9 \text{ кэВ}$) определяет возрастающую значимость этого радионуклида при возможном его вовлечении в основные пути поступления (ингаляционный и пищевой), ведущие непосредственно к человеку. Поэтому в настоящее время актуальным является уточнение содержания ^{241}Am в сравнении с ^{137}Cs в почве и продуктах питания, а также последующая оценка вклада каждого из радионуклидов в дозы облучения населения, проживающего в загрязненных районах. Решение этой задачи включало ряд этапов, каждый из которых посвящен одному из районов и является темой для отдельной публикации. В первой статье [7] данного цикла работ приводятся предварительные результаты оценки, выполненной для трех населенных пунктов Брагинского района, прилегающих к землям отселения ЧАЭС.

В настоящей работе выполнена оценка для всех обследованных населенных пунктов (н.п.) Брагинского района, включая городской поселок (г.п.) Брагин.

Цель исследования – выполнить оценку доз внутреннего облучения ^{241}Am и ^{137}Cs жителей населенных пунктов на территории Брагинского района Гомельской области Беларуси.

Задачи исследования

1. Провести сравнительный анализ уровней содержания ^{241}Am и ^{137}Cs в почве и продуктах питания местного производства на территории Брагинского района.
2. Оценить вклад ^{241}Am и ^{137}Cs в дозы внутреннего облучения населения, проживающего на территории частного сектора Брагинского района.

Материалы и методы

На территории 103 частных подворий в 28 населенных пунктах Брагинского района Гомельской области Беларуси в период 2017–2018 гг. был произведен отбор проб почвы и продуктов питания местного производства (табл. 1–3). Отбор проб почвы выполняли пробоотборником с грунтоприемной трубой диаметром 3,5 см [8] на глубину пахотного горизонта 20 см, на каждом участке проводили 5 уколов (точечных проб) методом конверта и формировали смешанный образец пробы почвы. Плотность сложения почвы различных участков различна, поэтому в лабораторных условиях определяли объемную плотность каждой пробы почвы. Отбор проб почвы сопровождали измерением мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД) на высоте 1 м от поверхности почвы с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ1125 (Атомтех, Минск). Дозиметр-радиометр во время измерения фиксировался в руках оператора; на каждом участке выполняли 5 измерений по методу конверта до статистической неопределенности не выше 20%.

После транспортировки пробы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния, помещали в сосуды Маринелли объемом 500 см^3 с фиксированной высотой заполнения измерительного сосуда для обеспечения унифицированной геометрии измерений. Содержание ^{241}Am ($E = 59,6 \text{ кэВ}$) и ^{137}Cs ($E = 661,6 \text{ кэВ}$) в почве определяли методом гамма-спектрометрии с использованием полупроводникового (коаксиального германиевого, серия XtRa) детектора расширенного энергетического диапазона «Canberra-GX3020», параметры измерений приведены в работе [7]. Время измерения составляло от нескольких часов до нескольких суток обратно пропорционально ожидаемой активности ^{241}Am в почве. Для определения удельной активности ^{241}Am по пику полного поглощения 59,6 кэВ считалась приемлемой погрешность не выше 30%.

Пробы продуктов питания местного производства отбирались на отдельных 7 частных подворьях, где установлено максимальное содержание ^{241}Am в пробах почвы. Продукты отбирались в количестве 1 кг каждого компонента основного рациона питания жителей населенных пунктов [9]: картофель, листовая зелень (салат, петрушка, лук), корнеплоды (свекла, морковь). Пробы клубне- и корнеплодов подвергались анализу после удаления частиц почвы посредством отмывки водой, но без снятия кожуры. Срез проб листовой зелени производился на высоте 2–3 см от поверхности почвы; и далее без процедуры очищения водой пробы направлялись на аналитические измерения. Такая предварительная пробоподготовка обеспечивала соблюдение наиболее консервативного подхода, учитывающего форму потребления населением продуктов, произведенных на личном подворье:

- клубни картофеля и корнеплодов без удаления кожуры («в мундире»);
- листовая зелень после срезки без предварительной обработки водой.

Определение удельной активности ^{137}Cs в пробах продуктов питания выполнялось гамма-спектрометрическим методом; погрешность измерений по пику полного поглощения 661 кэВ не превышала 30%. Определение удельной активности ^{241}Am в пробах продуктов выполня-

Таблица 1
Содержание ^{241}Am в почве подворий населенных пунктов Брагинского района Гомельской области, обследованных в 2017–2018 гг.

[Table 1

^{241}Am content in the soil of the farmlands of the Bragin district villages surveyed in the Gomel region in 2017–2018]

№	Населенный пункт [Village]	Кол-во проб (n) [Number of samples]	^{241}Am						Расстояние до ЧАЭС, км [Distance to the Chernobyl NPP, km]
			$A_{\text{сред}}$ [Aaver]		$A_{\text{мин}}$ [Amin]		$A_{\text{макс}}$ [Amax]		
			Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	
1	Брагин [Bragin]	12	10,4	1,6	5,0	0,9	26,9	2,8	46
2	Соболи [Soboli]	8	8,7	1,6	6,5	1,4	16,3	3,6	46
3	Бурки [Burki]	5	4,8	0,9	2,7	0,5	6,5	1,3	47
4	Ковали [Kovali]	4	5,9	1,2	4,6	0,9	8,3	1,4	47
5	Бакуны [Bakuni]	4	3,1	0,6	2,5	0,6	3,7	0,7	48
6	Микуличи [Mikulichi]	7	2,8	0,6	<1,1	<0,2	3,5	0,8	52
7	Маритон [Mariton]	3	3,8	0,7	2,5	0,6	3,6	0,7	56
8	Дублин [Dublin]	5	4,5	1,0	2,1	0,5	5,9	1,4	42
9	Грушное [Grushnoe]	5	4,5	0,8	2,4	0,5	8	0,9	32
10	Савичи [Savichi]	8	3,2	0,7	<0,8	<0,2	3,7	0,7	30
11	Волоховщина [Vолохов]	2	5,8	1,2	5,3	1,0	6,3	1,4	41
12	Ленинец [Leninist]	4	8,5	1,2	4,6	0,8	17,0	1,6	44
13	Шкураты [Shkuraty]	3	2,5	0,6	1,7	0,4	3,2	0,7	52
14	Пожарки [Pozharki]	2	3,1	0,6	<0,7	<0,1	3,1	0,6	52
15	Тельман [Telman]	3	4,4	0,8	3,4	0,6	5,6	1,0	49
16	Малейки [Malejki]	2	6,3	1,1	5,6	0,8	6,9	1,3	48
17	Городище [Gorodishe]	2	6,8	1,2	<0,8	<0,2	6,8	1,2	50
18	Михновка [Mihnovka]	3	2,5	0,6	1,4	0,3	3,1	0,8	57
19	Н. Путь [N. Put]	2	3,9	0,9	3,6	0,8	4,2	0,9	54
20	Рыжков [Rizhkov]	3	2,9	0,7	2,9	0,6	3,0	0,6	56
21	Котловица [Kotloviza]	3	4,7	1,0	3,6	0,8	5,7	1,2	48
22	Н. Мокрец [N. Mokrez]	3	2,5	0,6	1,4	0,4	3,4	0,8	52
23	Кривча [Krivcha]	3	3,9	0,8	3,5	0,8	4,3	0,6	45

Окончание таблицы 1

№	Населенный пункт [Village]	Кол-во проб (n) [Number of samples]	²⁴¹ Am						Расстояние до ЧАЭС, км [Distance to the Chernobyl NPP, km]
			A _{сред} [A _{aver}]		A _{мин} [A _{min}]		A _{макс} [A _{max}]		
			Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	
24	Н. Гребля [N. Greblya]	2	2,8	0,6	2,8	0,5	2,8	0,6	37
25	Гдень [Gden]	6	3,2	0,8	<1,2	<0,3	4,0	1,1	24
26	Кр. Гора [Kr. Gora]	1	7,6	1,1					44
27	Дубровное [Dubrovnoe]	1	3,9	0,8					46
28	Ч. Поле [Ch. Pole]	1	3,2	0,8					55

Таблица 2

Содержание ¹³⁷Cs в почве подворий населенных пунктов Брагинского района Гомельской области, обследованных в 2017–2018 гг.

[Table 2]

¹³⁷Cs content in the soil of the farmlands of the Bragin district villages surveyed in the Gomel region in 2017–2018]

№	Населенный пункт [Village]	Кол-во проб (n) [Number of samples]	МАЭД		¹³⁷ Cs					
			мин	макс	A _{сред}		A _{мин}		A _{макс}	
			мкЗв/ч		Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²
			[ADER]		[A _{aver}]		[A _{min}]		[A _{max}]	
			[min]	[max]	Bq/kg	kBq/m ²	Bq/kg	kBq/m ²	Bq/kg	kBq/m ²
			[μSv/h]							
1	Брагин [Bragin]	12	0,11	0,37	1768	282	825	101	2992	560
2	Соболи [Soboli]	8	0,11	0,26	1182	219	529	116	1630	296
3	Бурки [Burki]	5	0,12	0,13	678	129	587	95	800	158
4	Ковали [Kovali]	4	0,13	0,16	831	171	662	134	937	213
5	Бакуны [Bakuni]	4	0,13	0,16	698	112	580	114	805	150
6	Микуличи [Mikulichi]	7	0,13	0,25	1252	226	551	117	2126	350
7	Маритон [Mariton]	3	0,11	0,13	562	108	523	79	629	123
8	Дублин [Dublin]	5	0,09	0,12	370	81	234	54	462	94
9	Грушное [Grushnoe]	5	0,08	0,09	271	46	172	39	500	56
10	Савичи [Savichi]	8	0,09	0,14	422	90	75	16	786	181
11	Волоховщина [Voloohov]	2	0,11	0,13	655	91	648	146	662	125
12	Ленинец [Leninist]	4	0,14	0,22	1524	224	928	149	2524	237
13	Шкураты [Shkuraty]	3	0,08	0,09	261	64	167	41	324	72
14	Пожарки [Pozharki]	2	0,09	0,13	438	81	139	28	737	133
15	Тельман [Telman]	3	0,09	0,11	323	65	363	63	474	88

№	Населенный пункт [Village]	Кол-во проб (n) [Number of samples]	МАЭД		¹³⁷ Cs					
			мин	макс	A _{сред}		A _{мин}		A _{макс}	
			мкЗв/ч		Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²
			[ADER]		[A _{aver}]		[A _{min}]		[A _{max}]	
			[min]	[max]	Bq/kg	kBq/m ²	Bq/kg	kBq/m ²	Bq/kg	kBq/m ²
		[μSv/h]								
16	Малейки [Malejki]	2	0,08	0,10	438	74	346	48	530	100
17	Городище [Gorodishe]	2	0,08	0,09	327	72	62	15	342	60
18	Михновка [Mihnovka]	3	0,06	0,09	212	36	189	45	256	67
19	Н. Путь [N. Put]	2	0,08	0,09	323	71	303	71	342	72
20	Рыжков [Rizhkov]	3	0,09	0,11	406	95	362	77	452	85
21	Котловица [Kotloviza]	3	0,07	0,09	267	44	206	48	364	73
22	Н. Мокрец [N. Mokrez]	3	0,05	0,06	146	33	100	28	190	47
23	Кривча [Krivcha]	3	0,07	0,08	176	62	184	41	298	71
24	Н. Гребля [N. Greblya]	2	0,06	0,06	239	47	224	44	254	50
25	Гдень [Gden]	6	0,05	0,06	160	38	82	19	249	53
26	Кр. Гора [Kr. Gora]	1	0,16	0,17	1471	211				
27	Дубровное [Dubrovnое]	1	0,15	0,16	1016	203				
28	Ч. Поле [Ch. Pole]	1	0,10	0,11	85	462				

Таблица 3

Содержание ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs в продуктах питания подворий г.п. Брагин и н.п. Соболи Брагинского района Гомельской области

[Table 3

²⁴¹Am and ¹³⁷Cs contents in the foodstuffs of the farmlands of the settlements Braagin and Soboli, the Braagin district, the Gomel region]

Населенный пункт [Village]	Продукт [foodstuffs]	¹³⁷ Cs*	²⁴¹ Am*	¹³⁷ Cs КН**	²⁴¹ Am КН**	
		Бк/кг [Bq/kg]	мБк/кг [mBq/kg]	[¹³⁷ Cs F _v]	[²⁴¹ Am F _v]	
Брагин 1 [Braagin 1]	Картофель [Potatoes]	2,8±0,4	1,1±0,3	0,0102	0,0005	
	Брагин 2 [Braagin 2]	Картофель [Potatoes]	0,5±0,2	0,8±0,2	0,0011	0,0003
	Брагин 3 [Braagin 3]	Картофель [Potatoes]	<0,5	1,8±0,4	<0,0014	0,0009
Брагин 4 [Braagin 4]	Картофель [Potatoes]	0,6±0,2	1,1±0,3	0,0010	0,0007	
	Морковь [Carrot]	9,9±1,9	4,4±1,2	0,0221	0,0039	
	Свекла [Beet]	5,1±1,2	6,9±1,3	0,0114	0,0061	
	Листовая петрушка [Leaf parsley]	6,6±1,3	8,0±2,0	0,0428	0,0160	
	Листовой салат [Leaf salad]	3,7±0,9	3,4±0,7	0,0215	0,0013	
	Перо лука [Onion feather]	1,5±0,4	3,0±0,9	0,0097	0,0060	

Населенный пункт [Village]	Продукт [foodstuffs]	¹³⁷ Cs*	²⁴¹ Am*	¹³⁷ Cs КН**	²⁴¹ Am КН**
		Бк/кг [Bq/kg]	мБк/кг [mBq/kg]	[¹³⁷ Cs F _v]	[²⁴¹ Am F _v]
Брагин 5 [Bragin 5]	Картофель [Potatoes]	4,6±0,8	6,0±1,1	0,0134	0,0011
	Морковь [Carrot]	1,8±0,5	2,7±0,8	0,0070	0,0007
	Свекла [Beet]	13,9±1,8	8,5±2,0	0,0539	0,0021
	Листовая петрушка [Leaf parsley]	4,2±1,2	8,6±2,0	0,0244	0,0032
	Листовой салат [Leaf salad]	40,2±5,4	10,2±2,1	0,2607	0,0204
	Перо лука [Onion feather]	1,8±0,9	5,7±1,4	0,0105	0,0021
Соболи 4 [Soboli 4]	Картофель [Potatoes]	3,8±0,9	2,0±0,5	0,0191	0,0011
	Листовой салат [Leaf salad]	3,3±1,1	13,1±2,5	0,0296	0,0142
	Перо лука [Onion feather]	2,7±0,9	2,8±0,8	0,0242	0,0030
	Свекла [Beet]	2,7±0,4	3,7±0,7	0,0110	0,0034
Соболи 5 [Soboli 5]	Картофель [Potatoes]	2,8±0,4	5,1±1,0	0,0086	0,0035
	Листовая петрушка [Leaf parsley]	11,7±2,2	33,3±6,0	0,0872	0,0204
	Листовой салат [Leaf salad]	3,2±1,2	19,6±3,1	0,0279	0,0276
	Перо лука [Onion feather]	2,9±0,9	3,0±0,8	0,0253	0,0042

*Удельная активность радионуклидов в продуктах определена на натуральную массу. [The specific activity of radionuclides in the products is determined by the natural weight].

** 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 [Transfer factor or Concentration ratio (F_v). The ratio of the activity concentration of radionuclide in the plant (Bq kg⁻¹ dry weight) to that in the soil (Bq kg⁻¹ dry weight). Dimensionless].

лось методом комплексной радиохимической очистки с последующим альфа-спектрометрическим анализом. Алгоритм радиохимической процедуры включал очистку ²⁴¹Am с использованием селективных смол TRU-TEVA-Spec Resin и представлен в работе [7]. Погрешность определения ²⁴¹Am с введенной меткой ²⁴³Am не превышала 30%. Минимально-детектируемая активность (МДА) ²⁴¹Am в пробах продуктов зависела от зольного остатка пробы и не превышала 0,001 Бк /пробу.

Результаты и обсуждение

Результаты определения удельной активности и плотности загрязнения ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs в почве подворий Брагинского района обобщены в таблицах 1–2, удельная активность радионуклидов в почве приведена на воздушно-сухую массу. В качестве дополнительных характеристик в таблице 1 указано кратчайшее расстояние до ЧАЭС, а в таблице 2 приведен диапазон МАЭД на частных

подворьях этих н.п. Расположение обследованных н.п. относительно ЧАЭС и границ зоны отчуждения (Полесский государственный радиационно-экологический заповедник) представлено на рисунке 1. При этом как в таблицах 1–2, так и на рисунке 1 сохранены одни и те же порядковые номера населенных пунктов.

Как сообщалось в первой работе настоящего исследования [7], статистический анализ представленных в таблицах 1–2 результатов свидетельствует об отсутствии значимой корреляции между загрязнением ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs почвы и расстоянием до ЧАЭС, а также между загрязнением почвы ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs для исследованных 28 н.п. Брагинского района (см. рис. 1). Наибольшее загрязнение радионуклидами почвенного покрова отмечается в г.п. Брагин (№1), удаленном от ЧАЭС в северо-восточном направлении на расстояние 46 км. Здесь зафиксированы максимальные уровни удельной активности радионуклидов в почве подворий, а с учетом объемной плотности

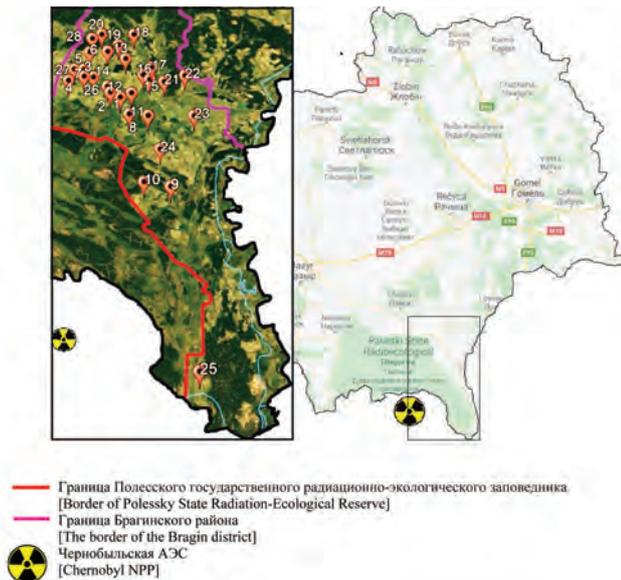


Рис. 1. Расположение населенных пунктов Брагинского района Гомельской области относительно зоны отчуждения (Полесский государственный радиационно-экологический заповедник) и ЧАЭС

[Fig. 1. Position of Bragin area settlements (Gomel region) relative to the exclusion zone (Polesie State Radiation and Ecology Reserve) and the Chernobyl Nuclear Power Plant]

сложения почвы плотность загрязнения ^{241}Am и ^{137}Cs достигает 2,8 и 560 $\text{кБк}/\text{м}^2$ соответственно. При этом самый южный н.п. района – Гдень (№ 25), расположенный на удалении 24 км в восточном направлении от ЧАЭС, характеризуется наименьшими значениями данных показателей – до 1,1 и 53 $\text{кБк}/\text{м}^2$ по ^{241}Am и ^{137}Cs соответственно. Таким образом, представленные в таблицах 1–2 и на рисунке 1 данные наглядно подтверждают существенную неравномерность радиоактивных выпадений на примере Брагинского района Гомельской области. В более отдаленных от ЧАЭС н.п. северной части района отмечается кратно большее загрязнение радионуклидами в сопоставлении с южной частью района.

Установлено, что значения МАЭД на приусадебных участках 28 н.п. Брагинского района находились в диапазоне от 0,05 до 0,37 $\text{мкЗв}/\text{ч}$ (см. табл. 2). При этом самые высокие показатели МАЭД отмечены именно в г.п. Брагин. Этот вывод согласуется с результатами регулярных измерений в пунктах постоянного контроля Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды Беларуси [10]. Между МАЭД и плотностью загрязнения ^{137}Cs (см. табл. 2) наблюдается достаточно сильная линейная взаимосвязь (рис. 2) – коэффициент корреляции составляет 0,85.

В то же время корреляция между МАЭД (см. табл. 2) и плотностью загрязнения ^{241}Am (см. табл. 1) отсутствует. Внешнее облучение ^{241}Am , обусловленное низкоэнергетическими γ -квантами ($E=59,6$ кэВ), в условиях реального чернобыльского загрязнения нивелируется на фоне продолжающей оставаться более высокой (на 2–4 порядка величины) активности ^{137}Cs ($E=661$ кэВ). Полученные результаты подтверждают, что на современном этапе ^{137}Cs является основным радионуклидом, определяющим

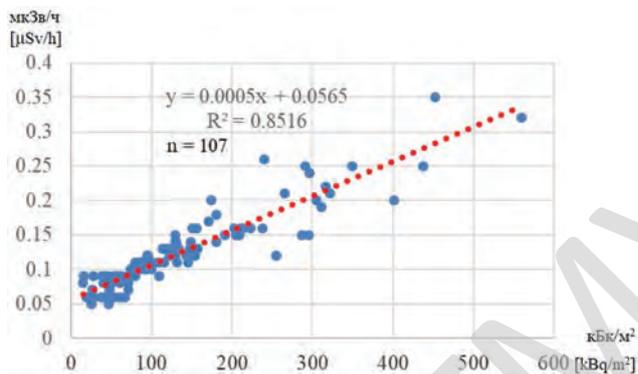


Рис. 2. Соотношение между измеренной мощностью амбиентного эквивалента дозы и экспериментально установленной плотностью загрязнения ^{137}Cs на частных подворьях Брагинского района в 2017–2018 гг.

[Fig. 2. Relationship between measured ambient dose equivalent rate and experimentally determined ^{137}Cs content in the soil of the farmlands of the Bragin district villages in 2017–2018]

щим техногенную составляющую мощности дозы гамма-излучения в воздухе на загрязненных территориях. Полученные результаты также согласуются с данными работы В.П. Рамзаева и А.Н. Барковского [11], в которой при обследовании радиоактивно загрязненных лугов и лесов в юго-западных районах Брянской области спустя 30 лет после Чернобыльской аварии было установлено, что ^{137}Cs являлся доминирующим источником гамма-излучения, а вклад природных радионуклидов в мощность дозы был равен в среднем 3%.

По результатам обследования и анализа данных 28 н.п. Брагинского района были выделены два пункта – г.п. Брагин (№1) и н.п. Соболи (№2), где отмечены наибольшие уровни содержания ^{241}Am в почве (см. табл. 1). На приусадебных участках указанных пунктов были отобраны продукты питания для установления содержания в них ^{241}Am , а также ^{137}Cs (см. табл. 3). Удельная активность ^{241}Am и ^{137}Cs в растительной продукции, выращиваемой населением на личных подворьях н.п. Соболи, была представлена в первой работе данного исследования [7]. Было показано, что максимальной удельной активностью ^{241}Am в продуктах питания на уровне 10–30 $\text{мБк}/\text{кг}$ продукта при естественной влажности характеризовались пробы листовой зелени петрушки и салата, при этом содержание ^{137}Cs в пробах данной растительной продукции на три порядка величины превышало содержание ^{241}Am . В настоящей работе также представлены результаты определения удельной активности ^{241}Am и ^{137}Cs в растительной продукции, получаемой населением на личных подворьях г.п. Брагин (см. табл. 3). Метод селективной радиохимической очистки позволил выделить ^{241}Am из зольных остатков проб и количественно определить содержание этого радионуклида в продуктах с пересчетом на натуральную массу.

Результаты таблицы 3 свидетельствуют, что аналогично картине загрязнения продуктов в н.п. Соболи [7], содержание ^{241}Am в г.п. Брагин во всех пробах продуктов на три порядка величины ниже (размерность $\text{мБк}/\text{кг}$), чем сопутствующего ^{137}Cs (размерность $\text{Бк}/\text{кг}$). Установлено,

что удельная активность ^{241}Am в пробах корне- и клубнеплодов, произведенных на отдельных частных подворьях г.п. Брагин, находится на уровне единиц мБк/кг, а в пробах листовой зелени может достигать десятков мБк/кг. Согласно известным литературным данным, основное содержание ^{241}Am в пробах корне- и клубнеплодов может присутствовать в кожуре этих культур [12, 13], а листовая поверхность в пробах зеленных культур является носителем как поверхностного, так и корневого загрязнения [14–17].

В таблице 3 также представлены параметры перехода ^{137}Cs и ^{241}Am (КН – коэффициенты накопления) для продуктов, которые представляют собой концентрационные отношения удельной активности радионуклида в растительном продукте к удельной активности в почве (в международных публикациях принят безразмерный аналог F_v – concentration ratio) [21, 22]. Коэффициенты накопления каждой группы растительных продуктов местного производства Брагинского района варьируют в пределах одного порядка величины и находятся в следующих диапазонах:

– для ^{137}Cs клубнеплоды (картофель) – 0,001–0,019, корнеплоды (свекла, морковь) – 0,007–0,054, зеленые листовые культуры (петрушка, салат, перо лука) – 0,01–0,26;

– для ^{241}Am картофель – 0,0003–0,0035, корнеплоды – 0,0007–0,0061, зеленые листовые культуры – 0,0013–0,0276.

КН для ^{137}Cs в большинстве продуктов на порядок величины превышают таковые для ^{241}Am . Сравнение полученных параметров перехода ^{137}Cs с данными справочника МАГАТЭ IAEA-TRS-472 показывает, что полученные параметры попадают в диапазон справочных данных, который является более широким и варьирует в пределах нескольких порядков величины. Следует отметить, что максимальные полученные КН ^{241}Am для листовых культур (0,0276) и корнеплодов (0,0061) превышают максимальные значения справочника (листовые – 0,0015, корнеплоды – 0,0017), а максимальный полученный КН ^{241}Am для картофеля (0,0035), наоборот, в 10 раз меньше максимального справочного параметра для клубнеплодов (0,034). Поэтому применение уточненных параметров перехода ^{241}Am для продуктов местного производства Брагинского района позволяет в целом снизить неопределенность дальнейшей оценки вклада данного радионуклида в дозы внутреннего облучения.

Оценка вклада ^{241}Am и ^{137}Cs в дозы внутреннего облучения населения, проживающего на территории частного сектора Брагинского района, выполнена, как и представлено в предыдущей работе на примере одного из подворий в н.п. Соболи [7], на основании фактических данных об уровнях современного загрязнения ^{241}Am и ^{137}Cs почвы и продуктов питания, получаемых жителями на личном подворье, в соответствии с рекомендациями [18–20] (табл. 4). В расчетах оценки ожидаемой дозы внутреннего облучения от поступающих по пищевой цепочке радионуклидов также 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 из почвы в продукты, харак-

теризующие 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 IAEA-TRS-472 [21, 22]. Для оценки ингаляционного пути поступления контролируемых радионуклидов были использованы установленные ранее коэффициенты ресуспензии [23, 24], характеризующие влияние сельскохозяйственных операций при выполнении населением полевых работ в загрязнение приземного воздуха радионуклидами. Расчет ожидаемой годовой дозы внутреннего облучения при поступлении радионуклидов с вдыхаемым воздухом произведен в предположении, что жители подворья выполняют пылеобразующие сельскохозяйственные работы на приусадебном участке 4 ч в день (2 ч утром, 2 ч вечером – согласно опросам населения) в течение 7 месяцев.

Результаты оценки доз внутреннего облучения жителей н.п. Брагинского района Гомельской области Беларуси (см. табл. 4) при производстве и потреблении продуктов питания на личном подворье свидетельствуют, что максимальные эффективные дозы от ингаляционного поступления ^{241}Am варьируют в пределах 0,006–0,033 мЗв/год и как минимум на один порядок величины превышают таковые дозы от ингаляционного поступления ^{137}Cs (0,0002–0,002 мЗв/год).

В структуре ожидаемой дозы внутреннего облучения от ^{241}Am населения всех н.п. Брагинского района преобладает ингаляционная составляющая, которая в 10 и более раз может превышать дозу облучения от поступления этого радионуклида пероральным путем. В то же время ожидаемая доза внутреннего облучения населения от ^{137}Cs практически на 100% формируется пероральным путем, а ингаляционная составляющая в годовой дозе внутреннего облучения жителей от данного радионуклида не превышает 0,2%. Максимальная ожидаемая доза внутреннего облучения от ^{137}Cs установлена для жителей г.п. Брагин и составляет 1,7 мЗв/год, при этом максимальная доза внутреннего облучения от ^{241}Am не превышает 0,03 мЗв/год (см. табл. 4). Иная ситуация в н.п. Гдень (№ 25), где при значительно меньших ожидаемых дозах внутреннего облучения от ^{241}Am (0,011 мЗв/год) и ^{137}Cs (0,15 мЗв/год), относительный вклад ^{241}Am в суммарную дозу облучения больше по сравнению с г.п. Брагин (№ 1). Очевидно, что и в других н.п. Брагинского района при снижении со временем уровней загрязнения ^{137}Cs вклад ^{241}Am в суммарную дозу облучения населения будет возрастать.

Таким образом, установленные уровни содержания ^{241}Am в почве н.п. Брагинского района могут обусловить 90–98% ожидаемой дозы внутреннего облучения жителей за счет ингаляционного поступления суммы радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs при выполнении полевых работ на приусадебных участках. Структура дозы внутреннего облучения за счет поступления ^{137}Cs существенно отличается от дозовой структуры ^{241}Am . На современном этапе доминирует пероральный путь поступления ^{137}Cs , который может обусловить 93–99% суммарной дозы внутреннего облучения жителей Брагинского района. Установленные уровни присутствия ^{241}Am в продуктах питания местного производства, которые население получает на своих участках, могут принести не более 0,3% в дозу внутреннего облучения от поступления суммы радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs пероральным путем.

Таблица 4

Оценка максимальной ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения от ^{241}Am и ^{137}Cs для подворий Брагинского района Гомельской области, мЗв/год

[Table 4

Assessment of the maximum expected effective internal dose from ^{241}Am and ^{137}Cs at the farmlands of Bragin district, Gomel region, mSv/ year]

№	Населенный пункт [Village]	^{137}Cs			^{241}Am		
		пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]	пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]
1	Брагин [Bragin]	1,70	0,0020	1,702	0,0013	0,027	0,028
2	Соболи [Soboli]	0,95	0,0011	0,951	0,0013	0,033	0,034
3	Бурки [Burki]	0,47	0,0006	0,471	0,0005	0,012	0,013
4	Ковали [Kovali]	0,55	0,0008	0,551	0,0007	0,013	0,014
5	Бакуны [Bakuni]	0,47	0,0005	0,471	0,0003	0,008	0,008
6	Микуличи [Mikulichi]	1,20	0,0011	1,201	0,0003	0,009	0,009
7	Маритон [Mariton]	0,37	0,0004	0,370	0,0004	0,006	0,007
8	Дублин [Dublin]	0,27	0,0003	0,270	0,0005	0,013	0,014
9	Грушное [Grushnoe]	0,30	0,0002	0,300	0,0006	0,011	0,012
10	Савичи [Savichi]	0,47	0,0006	0,471	0,0004	0,011	0,011
11	Волоховщина [Voloхов]	0,40	0,0005	0,401	0,0005	0,012	0,013
12	Ленинец [Leninist]	1,50	0,0011	1,501	0,0013	0,014	0,015
13	Шкураты [Shkuraty]	0,19	0,0003	0,190	0,0003	0,007	0,007
14	Пожарки [Pozharki]	0,44	0,0005	0,441	0,0003	0,006	0,006
15	Тельман [Telman]	0,29	0,0003	0,290	0,0004	0,009	0,009
16	Малейки [Malejki]	0,32	0,0004	0,320	0,0005	0,012	0,013
17	Городище [Gorodishe]	0,21	0,0002	0,210	0,0005	0,011	0,012
18	Михновка [Mihnovka]	0,15	0,0002	0,150	0,0002	0,007	0,007
19	Н. Путь [N. Put]	0,21	0,0003	0,210	0,0003	0,008	0,008
20	Рыжков [Rizhkov]	0,27	0,0004	0,270	0,0003	0,008	0,008
21	Котловица [Kotloviza]	0,22	0,0003	0,220	0,0005	0,011	0,012
22	Н. Мокрец [N. Mokrez]	0,12	0,0002	0,120	0,0003	0,008	0,008
23	Кривча [Krivcha]	0,18	0,0003	0,180	0,0004	0,010	0,010
24	Н. Гребля [N. Greblya]	0,15	0,0002	0,150	0,0002	0,006	0,006
25	Гдень [Gden]	0,15	0,0002	0,150	0,0004	0,011	0,011
26	Кр. Гора [Kr. Gora]	0,86	0,0008	0,861	0,0006	0,011	0,012

№	Населенный пункт [Village]	¹³⁷ Cs			²⁴¹ Am		
		пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]	пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]
27	Дубровное [Dubrovnoe]	0,60	0,0007	0,601	0,0003	0,008	0,008
28	Ч. Поле [Ch. Pole]	0,28	0,0003	0,280	0,0004	0,008	0,008

Результаты опроса жителей н.п. Брагинского района свидетельствуют о том, что в настоящий период времени производством мясо-молочной продукции на своих приусадебных участках занимаются только единичные подсобные хозяйства. Поэтому можно заключить, что реальная доза от поступления радионуклидов по пищевой цепочке у жителей большинства обследованных н.п. будет меньше, чем консервативно оцененная доза (см. табл. 4). При надлежащем соблюдении гигиенических требований отмытые зеленые культуры и очищенные от кожуры корне-клубнеплоды могут сократить нежелательное поступление альфа-излучающего ²⁴¹Am в рацион жителей по пищевой цепочке. Кроме того, ограничение полевых работ на частном подворье с большим пылеобразованием (работа на пересохшей почве) может являться также дополнительным резервом для сокращения поступления радионуклидов в организм жителей ингаляционным путем.

Заключение

Получены актуальные данные по содержанию ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs в почве и продуктах питания местного производства на приусадебных участках 28 населенных пунктов Брагинского района Гомельской области.

Наибольшее загрязнение радионуклидами отмечается в административном центре района – г.п. Брагин, где плотность загрязнения ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs достигает 2,8 и 560 кБк/м² соответственно. Самый южный в районе н.п. Гдень характеризуется наименьшим загрязнением почвы техногенными радионуклидами – до 1,1 и 53 кБк/м² по ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs соответственно. Значения МАЭД на приусадебных участках Брагинского района находились в диапазоне от 0,05 до 0,37 мкЗв/ч, между МАЭД и плотностью загрязнения ¹³⁷Cs подтверждена корреляционная связь, которая отсутствует для ²⁴¹Am.

Установлено, что удельная активность ²⁴¹Am в г.п. Брагин во всех пробах продуктов на три порядка величины ниже, чем ¹³⁷Cs. Удельная активность ²⁴¹Am в пробах корне- и клубнеплодов, произведенных на отдельных частных подворьях г.п. Брагин, находится на уровне единиц мБк/кг, а в пробах листовой зелени может достигать десятков мБк/кг.

На основании фактических данных об уровнях современного загрязнения ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs почвы и продуктов питания выполнена оценка вклада данных радионуклидов в дозы внутреннего облучения населения, проживающего в частном секторе Брагинского района с учетом поступления радионуклидов ингаляционным и пероральным путями. Максимальные дозы от ингаляционного поступления ²⁴¹Am варьируют в пределах 0,006–0,033 мЗв/год и пре-

вышают на порядок величины дозы от поступления ¹³⁷Cs с вдыхаемым воздухом (0,0002–0,002 мЗв/год).

Максимальная ожидаемая доза внутреннего облучения от ¹³⁷Cs установлена для жителей г.п. Брагин – 1,7 мЗв/год, при этом максимальная доза внутреннего облучения от ²⁴¹Am не превышает 0,03 мЗв/год.

В целом, на современном этапе доминирует пероральный путь поступления ¹³⁷Cs, который может обусловить 93–99% дозы внутреннего облучения жителей Брагинского района.

Соблюдение гигиенических требований при употреблении продуктов питания местного производства, а также ограничение полевых работ в засушливый период может способствовать сокращению поступления радионуклидов в организм и снижению ожидаемой дозы внутреннего облучения жителей.

Благодарность

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси» Л.В. Жуковой, Т.В. Ласько, М.В. Фирсаковой, В.А. Касьянчику за участие в выполнении работ на этапах проведения измерений содержания радионуклидов в образцах, их отбора и подготовки к анализу.

Авторы благодарны рецензентам за ценные замечания и рекомендации, которые помогли существенно улучшить качество статьи и позволили увидеть перспективу для дальнейшего развития данного направления исследований.

Литература

1. International Atomic Energy Agency (IAEA) The International Chernobyl Project, Technical report: Assessment of radiological consequences and evaluation of protective measures: Report by an International Advisory Committee. Vienna: IAEA, 1991, ISBN 92-0-129191-4. 640 p.
2. Беларусь и Чернобыль: 34 года спустя. Информационно-аналитические материалы. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Минск: ИВЦ Минфина, 2020. 38 с.
3. 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. 140 с.
4. Сколько населенных пунктов находится в зонах радиоактивного загрязнения в результате чернобыльской катастрофы? <https://chernobyl.mchs.gov.by/novosti/2020-04-01-304098/> (Дата обращения 28.05.2020).
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. 219 p.
6. Конопля Е.Ф., Кудряшов В.П., Миронов В.П. Радиация и Чернобыль: Трансурановые элементы на территории Беларуси. Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2007. 128 с.
 7. Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., и др. ^{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. Т.12, № 2 (спецвыпуск). С. 75-82. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12s-75-82.
 8. Булавик И.М., Переволоцкий А.Н., Дударева Н.В., Тагай С.А. Патент № 3793 Респ. Беларусь, МПК G01N1/04. Пробоотборник для послойного извлечения образцов грунта: пат. на полезную модель; опубл. 30.08.07 // Афицыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2007. № 4(57). С. 231-232.
 9. Потребление продуктов питания в домашних хозяйствах. Национальный статистический комитет Республики Беларусь: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/solialnaya-sfera/uroven-zhizni-naseleniya/dokhody-i-potreblenie-domashnikh-khozyaystv/operativnye-dannye/potreblenie-osnovnykh-produktov-pitaniya-v-domashnikh-khozyaystvakh/> (Дата обращения: 31.05.2020).
 10. Радиационно-экологическая обстановка в Республике Беларусь: <http://rad.org.by/news/radiacionno-ekologicheskaya-obstanovka-v-respublike-belarus.html> (Дата обращения 28.05.2020).
 11. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Корреляция между расчетными и измеренными значениями мощности дозы гамма-излучения в воздухе в лесах, загрязненных ^{137}Cs : отдаленный период после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 4. С. 37–46. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-37-46
 12. Popplewell D.S., Ham G.J., Johnson T.E., et al. The uptake of plutonium-238, 239, 240, americium-241, strontium-90 and caesium-137 into potatoes // Science of the Total Environment. 1984. Vol. 38. P. 173-181.
 13. Апплби Л.Дж., и др. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля; пер. с англ., под ред. Уорнера Ф. и Харрисона Р. М.: Мир, 1999. 512 с.
 14. Павлоцкая Ф.И., Ю.И. Пospelov, Б.Ф. Мясоедов, и др. Поведение трансплутониевых элементов в окружающей среде // Радиохимия. 1991. № 5. С. 112–119.
 15. Аверин В.С., Подоляк А.Г., Тагай С.А., и др. Америций и плутоний в агроэкосистемах. Чернобыльская катастрофа 1986 года. РНИУП «Институт радиологии». Мн., 2014. 176 с.
 16. Romney E.M., Wallace A., Schulz R.K., et al. Plant uptake of ^{237}Np , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , and ^{244}Cm from soils representing major food production areas of the United States // Soil Science. 1981. Vol. 132, No. 1. P. 40-59. DOI: 10.1097/00010694-198107000-00007
 17. 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. Vol. 63, No. C. P. 111-124. DOI: doi.org/10.1016/0048-9697(87)90040-4.
 18. International Atomic Energy Agency (IAEA) Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards: general safety requirements. Interim edition. Vienna: IAEA, 2011. 303 p.
 19. International Atomic Energy Agency (IAEA) IAEA-TECDOC-1162. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency: updating IAEA-TECDOC-1162. Vienna: IAEA, 2000. 194 p.
 20. International Atomic Energy Agency (IAEA) Safety Standards for protecting people and environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. Part 3 No GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 436 p.
 21. International Atomic Energy Agency (IAEA) Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments/Technical Reports Series. TRS-472. Vienna: IAEA, 2010. 208 p.
 22. International Atomic Energy Agency (IAEA) Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments / IAEA-TECDOC-1616. Vienna: IAEA, 2009. 307 p.
 23. Подоляк А.Г., Тагай С.А., Аверин В.С., и др. Дозы облучения работников при проведении сельскохозяйственных операций на загрязнённой радионуклидами (^{137}Cs , ^{241}Am и $^{238,239+240}\text{Pu}$) территории // Радиация и риск. 2014. Том 23, № 2. С.85-93.
 24. 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. Vol. 52, No. 1. P. 37-43.

Поступила: 20.06.2020 г.

Нилова Екатерина Константиновна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Центр по ядерной и радиационной безопасности Министерства чрезвычайных ситуаций Республики Беларусь, Минск, Беларусь

Бортновский Владимир Николаевич – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой общей гигиены, экологии и радиационной медицины Гомельского государственного медицинского университета, Гомель, Беларусь

Тагай Светлана Алексеевна – научный сотрудник Института радиобиологии Национальной академии наук Беларуси. Адрес для переписки: 246000, Беларусь, Гомель, ул. Федюнинского, д. 16; E-mail: lanabuz@tut.by

Дударева Наталья Владимировна – научный сотрудник Института радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Никитин Александр Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией радиоэкологии Института радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь.

Для цитирования: Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., Дударева Н.В., Никитин А.Н. Оценка современных уровней ^{241}Am и ^{137}Cs в почве, продуктах питания, доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов, прилегающих к зоне отселения Чернобыльской АЭС (на примере Брагинского района Гомельской области Беларуси) // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 25–37. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-25-37

Assessment of the current levels of ^{241}Am and ^{137}Cs in soils and foodstuff, as well as of public internal exposure to ionizing radiation in populated areas adjacent to the Chernobyl NPP exclusion zone (case study: the Bragin district of the Gomel region, Belarus)

Ekaterina K. Nilova ¹, Vladimir N. Bortnovsky ²,

Svetlana A. Tagai ³, Natalia V. Dudareva ³, Alexander N. Nikitin ³

¹ Center for Nuclear and Radiation Safety of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

² Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

³ Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

This paper is part of a research cycle focusing on studying the current levels of ^{241}Am and ^{137}Cs in soils and local foodstuffs of populated areas neighboring the Chernobyl exclusion zone. Our objective was to estimate the maximum annual committed internal doses to individuals of the Bragin-area settlements from inhalation and consumption of locally produced foods. We updated the data on the levels of ^{241}Am and ^{137}Cs in soils of 28 settlements of the district. Specific activity of ^{241}Am in soils in two of the settlements were the highest of all; we took and analyzed samples of local-grown foodstuff. ^{241}Am in food samples was measured via a radiochemical method with the use of selective chromatographic resins and alpha-spectrometry measurement. A gamma-spectrometry technique was used to measure ^{241}Am in soil and ^{137}Cs in soil and food samples. The most contaminated by ^{241}Am and ^{137}Cs appeared the soils in the town of Bragin, the administrative center of the district where the respective levels were as high as 2.8 and 560 kBq/m². Among the analyzed samples, the specific activities of ^{241}Am in root and tuber crops were one-digit values, while the samples of leafy vegetables contained a few tens of mBq/kg of the same radionuclide. That said, however, ^{241}Am concentrations in food samples were lower than those of ^{137}Cs by three orders of magnitude. The results showed an apparent difference between estimated annual committed internal doses to the Bragin residents due to ^{241}Am intake and that resulting from ^{137}Cs with the respective 0.03 and 1.7 mSv/year. The maximum doses to population of the Bragin-district villages from inhalation of ^{241}Am varied from 0.006 to 0.033 mSv/year exceeding the doses from inhaled ^{137}Cs – 0.0002–0.002 mSv/year – by one order of magnitude. The major contribution to the public internal exposure today is ^{137}Cs intake through consumption of contaminated food that produced locally; its contribution is about 93–99% of the total internal dose received by the Bragin-district residents.

Key words: ^{241}Am , ^{137}Cs , deposition density, specific activity, population, foodstuff, inhalation, internal exposure.

References

1. International Atomic Energy Agency (IAEA) The International Chernobyl Project, Technical report: Assessment of radiological consequences and evaluation of protective measures: Report by an International Advisory Committee. Vienna: IAEA; 1991: 640. ISBN 92-0-129191-4.
2. Belarus and Chernobyl: 34 years later. Information and analytical materials. Department for elimination of consequences of the Chernobyl disaster of the Ministry of emergency situations of the Republic of Belarus. Minsk: IVC Minfina; 2020: 38. (In Russian).
3. 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: 140. (In Russian).
4. How many settlements are located in areas of radioactive contamination as a result of the Chernobyl disaster? – Available from: <https://chernobyl.mchs.gov.by/novosti/304098/> [Accessed 31 May 2020] (In Russian).
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: 219.
6. Konoplya EF, Kudryashov VP, Mironov VP. Radiation and Chernobyl: Transuranic elements on the Belarus territory, Gomel: RNIUP «Institute Radiologii»; 2007: 128. (In Russian).
7. 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 Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2s-75-82.
8. Bulavik IM, Perevolotskiy AN, Dudareva NV, Tagai SA inventors; Institute of Radiology, assignee. Republic of Belarus patent BY 3793. 2007: 231-232. (In Russian).
9. Food consumption in households. National statistical Committee of the Republic of Belarus. – Available from: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/sobremennaya-sfera/uroven-zhizni-naseleniya/dokhody-i-potrebleniye-domashnikh-khozyaystv/operativnyye-dannye/potrebleniye-osnovnykh-produktov-pitaniya-v-domashnikh-khozyaystvakh>. [Accessed 28 May 2020] (In Russian).

Svetlana A. Tagai

Institute of Radiobiology

Address for correspondence: Fediuninsky Str., 16, Gomel, 246000, Belarus; E-mail: lanabuz@tut.by

10. Radiation and environmental situation in the Republic of Belarus. – Available from: <http://rad.org.by/news/radiacion-no-ekologicheskaya-obstanovka-v-respublike-belarus.html> [Accessed 28 May 2020] (In Russian).
11. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Correlation between calculated and measured values of gamma dose rate in air in forests contaminated with ¹³⁷Cs: the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 37-46. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-37-46
12. 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: 173-181.
13. Applbi LDzh, et al. Ways of migration of artificial radionuclides in the environment. Radioecology after Chernobyl. Ed. by Warner F, Harrison RM. Moscow: «Mir»; 1999: 512. (In Russian).
14. Pavlotskaya FI, Pospelov Yul, Myasoyedov BF, Kuznetsov YuV, Legin VK. The behavior of transplutonium elements in the environment. *Radiokhimiya = Radiochemistry*. 1991;5: 112–119. (In Russian).
15. Averin VS, Podolyak AG, Tagai SA, Kukhtevich AB, Buzdalkin KN, Tsarenok AA, et al. Americium and plutonium in agroecosystems. 1986 Chernobyl disaster. Gomel: RNIUP «Institute Radiologii»; 2014: 176. (In Russian).
16. Romney EM, Wallace A, Schulz RK, et al. Plant uptake of ²³⁷Np, ^{239,240}Pu, ²⁴¹Am, and ²⁴⁴Cm from soils representing major food production areas of the United States. *Soil Science*. 1981;132(1): 40-59. DOI: 10.1097/00010694-198107000-00007
17. Bunzl K, Kracke W. Soil to plant transfer of ^{239 + 240}Pu, ²³⁸Pu, ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr 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: doi.org/10.1016/0048-9697(87)90040-4.
18. International Atomic Energy Agency (IAEA) Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards: general safety requirements. Interim edition. Vienna: IAEA; 2011: 303.
19. International Atomic Energy Agency (IAEA) IAEA-TECDOC-1162. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency: updating IAEA-TECDOC-1162. Vienna: IAEA; 2000: 194.
20. International Atomic Energy Agency (IAEA) Safety Standards for protecting people and environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. Part 3 No GSR Part 3. Vienna: IAEA; 2014: 436.
21. International Atomic Energy Agency (IAEA) Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments/ Technical Reports Series. TRS-472. Vienna: IAEA; 2010: 208.
22. International Atomic Energy Agency (IAEA) Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments / IAEA-TECDOC-1616. Vienna: IAEA; 2009: 307.
23. Podolyak AG, Tagai SA, Averin VS, Buzdalkin KN, Nilova EK. Radiation doses received by the workers involved in agricultural operations on the territories contaminated by radionuclides (¹³⁷Cs, ²⁴¹Am and ^{238,239+240}Pu). *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2014;23(2): 85-93. (In Russian).
24. 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.

Received: June 20, 2020

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

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

For correspondence: Svetlana A. Tagai – Researcher, Institute of Radiobiology of National Academy of Sciences of Belarus (Fediuninsky Str., 16, Gomel, 246000, Belarus; E-mail: lanabuz@tut.by)

Natalia V. Dudareva – Researcher, Institute of Radiobiology of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

Alexander N. Nikitin – Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory of Radioecology, Institute of Radiobiology of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

For citation: Nilova E.K., Bortnovsky V.N., Tagai S.A., Dudareva N.V., Nikitin A.N. Assessment of the current levels of ²⁴¹Am and ¹³⁷Cs in soils and foodstuff, as well as of public internal exposure to ionizing radiation in populated areas adjacent to the Chernobyl NPP exclusion zone (case study: the Bragin district of the Gomel region, Belarus). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 25-37. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-25-37