

²⁴¹Am на территориях, прилегающих к белорусскому сектору зоны отселения Чернобыльской АЭС: загрязнение почв, продуктов питания и оценка доз внутреннего облучения населения

Е.К. Нилова¹, В.Н. Бортновский², С.А. Тагай³, Н.В. Дударева³, Л.В. Жукова³

¹ Центр по ядерной и радиационной безопасности МЧС Республики Беларусь, Минск, Беларусь

² Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

³ Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

²⁴¹Am является единственным радионуклидом чернобыльских радиоактивных выпадений, содержание которого в окружающей среде до 2058 г. продолжает возрастать. Целью настоящей работы являлась оценка доз внутреннего облучения ²⁴¹Am жителей населенных пунктов на территории, прилегающей к зоне отселения Чернобыльской АЭС. Для достижения цели были установлены современные уровни содержания ²⁴¹Am и сопутствующего ¹³⁷Cs в почве и продуктах питания на частных подворьях Брагинского района Гомельской области Беларуси. Содержание ²⁴¹Am ($E\gamma=59,6$ кэВ) в почве и ¹³⁷Cs ($E\gamma=661$ кэВ) в почве/продуктах определяли методом гамма-спектрометрии. Определение удельной активности ²⁴¹Am в пробах продуктов питания выполнялось радиохимическим методом с использованием селективных экстракционно-хроматографических смол. При среднем уровне $1,3$ кБк/м² максимальная плотность загрязнения почвы ²⁴¹Am может достигать $3,6$ кБк/м², а для сопутствующего ¹³⁷Cs — на $1-2$ порядка величины выше и варьирует в пределах от 50 кБк/м² до 350 кБк/м². Максимальная удельная активность ²⁴¹Am в продуктах установлена в пробах листовой зелени петрушки — 33 мБк/кг, а в пробах картофеля, свеклы, лука (перо) не превышала 5 мБк/кг. Содержание сопутствующего ¹³⁷Cs в пробах растительной продукции находилось в пределах $3-12$ Бк/кг. В расчетах оценки ожидаемой дозы внутреннего облучения по пищевой цепочке консервативно принималось, что все основные компоненты рациона население получает на личном подворье. Расчет дозы внутреннего облучения при ингаляции произведен в предположении, что жители подворья выполняют работы на приусадебном участке 4 ч в день в течение 7 месяцев. В суммарной ожидаемой дозе внутреннего облучения от ²⁴¹Am жителей подворья преобладает ингаляционная составляющая, тогда как пероральный путь является доминирующим в формировании суммарной дозы внутреннего облучения от сопутствующего ¹³⁷Cs, которая в 20 и более раз превышает таковую дозу от ²⁴¹Am.

Ключевые слова: ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, плотность загрязнения почвы, удельная активность, население, продукты питания, ингаляция, доза внутреннего облучения.

Введение

В радиоактивных выпадениях чернобыльского генезиса, кроме α -излучающих изотопов плутония, присутствовал также β -излучающий изотоп — ²⁴¹Pu ($T_{1/2} = 14,3$ лет), который составлял около 98% (по активности) от суммы изотопов плутония [1, 2]. Согласно оценкам доклада Генассамблеи Научного комитета ООН по действию атомной радиации (UNSCEAR 2008), начальная активность ²⁴¹Pu в составе выбросов ЧАЭС составляла $2,6$ ПБк. Дочерним продуктом распада ²⁴¹Pu является радионуклид ²⁴¹Am. Продолжительный период полураспада ²⁴¹Am ($T_{1/2} = 432,2$ лет) с испусканием высокоэнергетических α -частиц ($E=5485,6$ кэВ, $5442,9$ кэВ) определяет возрастающую значимость этого радионуклида при возможном его вовлечении в пищевые цепочки, ведущие непосредственно

к человеку. В настоящее время ²⁴¹Am является единственным радионуклидом из состава чернобыльских радиоактивных выпадений, содержание которого в окружающей среде продолжает возрастать. Максимальная общая активность ²⁴¹Am в окружающей среде ожидается в 2058 г. и будет составлять $0,077$ ПБк, что в 2 раза превысит суммарное количество ²³⁸Pu, ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu в указанное время [2].

Наиболее высокие уровни поверхностного загрязнения почвы изотопами плутония после чернобыльской катастрофы характерны для южных районов Гомельской области Беларуси, часть из которых включены в зону отселения и не используются для проживания [3]. На современном этапе при снижении уровня загрязнения почв ¹³⁷Cs (убыль за счет радиоактивного распада составляет $2,27\%$ год) актуальным является уточнение текущих уров-

Тагай Светлана Алексеевна

Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси

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

ней содержания ^{241}Am и оценка его вклада в дозы облучения населения, проживающего на данной территории.

Цель исследования – оценить дозы внутреннего облучения ^{241}Am жителей населенных пунктов на территории, прилегающей к зоне отселения Чернобыльской АЭС.

Задачи исследования

В число задач исследования входило:

- установить современные уровни содержания ^{241}Am и сопутствующего ^{137}Cs в почве и продуктах питания на частных подворьях Брагинского района Гомельской области Беларуси;

- выполнить оценку максимальной ожидаемой годовой дозы внутреннего облучения от ^{241}Am и ^{137}Cs для жителей частных подворий Брагинского района с учетом поступления при ингаляции и по пищевой цепочке.

Материалы и методы

В период 2017–2018 гг. был произведен отбор проб почвы и продуктов питания из частных подворий населенных пунктов на территории радиоактивного загрязнения Брагинского района Гомельской области Беларуси. Для получения сопоставимых результатов применялся унифицированный метод пробоотбора. Отбор проб почвы на участках частных подворий выполняли пробоотборником с грунтоприемной трубкой диаметром 3,5 см на глубину пахотного горизонта 20 см. На каждом участке проводили 5 уколов (точечных проб) методом конверта и сформировывали смешанный образец каждой пробы почвы. Площадка отбора каждой точечной пробы выбиралась на ровном открытом месте, не менее 20–30 м от дорог. На выбранных участках отбора проб почвы проводили 3–5 измерений мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МЭД) на высоте 1 м от поверхности почвы дозиметром-радиометром МКС-АТ1125 до достижения статистической погрешности не более 15%. На участках частных подворий Брагинского района МЭД составляла 0,07–0,37 мкЗв/ч. Плотность сложения почвы различных участков различна, поэтому в лабораторных условиях определяли объемную плотность каждой пробы почвы.

После транспортировки пробы почвы освобождали от включений (камни, корни) и высушивали до воздушно-сухого состояния. Далее почвенные пробы помещали в сосуды Маринелли объемом 500 см³ с фиксированной высотой заполнения измерительного сосуда для обеспечения унифицированной геометрии измерений. Содержание ^{241}Am ($E_{\gamma}=59,6$ кэВ) и ^{137}Cs ($E_{\gamma}=661$ кэВ) в почве определяли методом гамма-спектрометрии с использованием полупроводникового (коаксиального германиевого, серия XtRa) детектора расширенного энергетического диапазона «Canberra-GX3020». Детектор GX3020 имеет тонкий мертвый слой толщиной 0,3 мм, что позволяет в сочетании с бериллиевым окном криостата толщиной 0,5 мм обеспечить регистрацию излучения в диапазоне низких энергий до 3 кэВ. В области 60 кэВ энергетическое разрешение FWHM оставляло 0,87 кэВ, эффективность 0,03 (отн. ед. для геометрии сосудов Маринелли). Защита детектора: наружная стальная оболочка 9,5 мм, свинец 102 мм, внутренние слои олова 1 мм и меди 1,6 мм, что обеспечивает уровень фона 0,017 с⁻¹.

Время измерения в зависимости от активности проб для сведения к минимуму статистической погрешнос-

ти варьировалось от 1 ч до 1 сут. Погрешность 30% для определения ^{241}Am ($E_{\gamma}=59,6$ кэВ) считалась приемлемой. Контроль качества измерений проводили с использованием аттестованного стандартного образца по удельной активности радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs .

В целом, почвенные образцы отбирались с территории частных подворий по принципу оптимального охвата площади населенного пункта, т.е. места отбора проб сосредоточены на условно равном расстоянии друг от друга, чтобы получить наиболее адекватную оценку степени загрязненности исследуемого населенного пункта. Всего в Брагинском районе было обследовано 28 населенных пунктов, отобрано и проанализировано 108 проб почвы на территории личных подворий этих пунктов.

Пробы продуктов питания отбирались из двух личных подсобных хозяйств, где установлено максимальное содержание ^{241}Am в пробах почвенных образцов. Отбирались продукты питания в количестве 1 кг каждого основного ингредиента рациона питания жителей населенных пунктов: картофель (2 пробы), зеленные культуры (5 проб), корнеплоды (свекла, 1 проба). Пробы клубне- и корнеплодов подвергались анализу после удаления частиц почвы посредством отмывки водой, но без снятия кожуры. Срез проб листовой зелени (салат, лук, петрушка) производился на высоте 2–3 см от поверхности почвы; и далее, без процедуры очищения водой указанные образцы направлялись на аналитические измерения. Таким образом, предварительная пробоподготовка обеспечивала соблюдение наиболее консервативного подхода, учитывающего достаточно распространенную форму потребления населением продуктов, произведенных на личном подворье:

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

Определение удельной активности ^{137}Cs в пробах продуктов питания выполнялось гамма-спектрометрическим методом.

Определение удельной активности ^{241}Am в пробах продуктов питания выполнялось радиохимическим методом (Методика выполнения измерений 4486-2012. Методика определения удельных активностей ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am в биологических объектах альфа-спектрометрическим методом с использованием ионообменного и экстракционно-хроматографического материала и получением счетного образца электроосаждением) [Method for measuring specific activity of ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am in biological objects by alpha-spectrometry using ion-exchange and extraction chromatographic materials, as well as obtaining counting sample by sedimentation (In Russian)]. Алгоритм радиохимической процедуры включал следующие основные операции: озоление; кислотное вскрытие; концентрирование и очистка от радионуклидов щелочных и щелочноземельных металлов; очистка Am от Pu (IV) на Anion Exchange Resin; очистка Am от Sr (II) и Fe (II) на TRU-Spec Resin; очистка Am от лантаноидов на TEVA-Spec Resin; электроосаждение Am на счетную мишень в виде металлического диска. Измерение активности ^{241}Am выполнялось на альфа-спектрометрическом комплексе Alpha Analyst, Canberra, с кремниевым полупроводниковым детектором PIPS, энергетическое разрешение < 15 КэВ, эффективность регистрации в диапазоне

энергий 3–6 МэВ (для расстояния образец-детектор 5 мм не менее 18%, для расстояния образец – детектор 1 мм не более 31%), фон < 1 имп/ч для энергий более 3 МэВ. Время измерения счетной мишени составляло 1–4 сут. Химический выход по вводимой метке ²⁴³Am варьировал в пределах 80–95%. Погрешность определения активности не превышала 30%. Минимально-детектируемая активность (МДА) ²⁴¹Am в пробах продуктов зависела от массы зольного остатка пробы и не превышала 0,001 Бк /пробу.

Результаты и обсуждение

По результатам определения содержания ²⁴¹Am в почве частных подворий населенных пунктов Брагинского района были сформированы три группы населенных пунктов, которые характеризуются минимальным, средним

и максимальным уровнем удельной активности ²⁴¹Am в почве:

- 1 группа (табл. 1) $A < 5$ Бк/кг
установлено минимальное содержание ²⁴¹Am в почве подворий населенного пункта – удельная активность ²⁴¹Am меньше минимально-детектируемой активности, либо с учетом погрешности не превышает уровень 5 Бк/кг.
- 2 группа (табл. 2) $A < 10$ Бк/кг
установлено среднее содержание ²⁴¹Am в почве подворий населенного пункта – удельная активность ²⁴¹Am с учетом погрешности не превышает уровень 10 Бк/кг.
- 3 группа (табл. 3) $A > 10$ Бк/кг
установлено максимальное содержание ²⁴¹Am в почве подворий населенного пункта – удельная активность ²⁴¹Am с учетом погрешности может превышать уровень 10 Бк/кг.

Таблица 1

Содержание ²⁴¹Am и сопутствующего ¹³⁷Cs в почве подворий н.п. Микуличи Брагинского района Гомельской области

[Table 1

²⁴¹Am and accompanying ¹³⁷Cs contents in the soil of the farmlands of Mikulichi village of Bragin district, Gomel region]

Населенный пункт [Village]	²⁴¹ Am		¹³⁷ Cs	
	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]
Микуличи 1 [Mikulichi 1]	2,8±0,7	0,46	2130±270	350
Микуличи 2 [Mikulichi 2]	<1,8	–	1560±200	322
Микуличи 3 [Mikulichi 3]	3,5±1,5	0,81	1320±170	305
Микуличи 4 [Mikulichi 4]	2,2±0,6	0,54	1280±160	311
Микуличи 5 [Mikulichi 5]	<1,1	–	930±120	171
Микуличи 6 [Mikulichi 6]	<1,8	–	550±70	117
Микуличи 7 [Mikulichi 7]	<1,7	–	1010±130	223

Таблица 2

Содержание ²⁴¹Am и сопутствующего ¹³⁷Cs в почве подворий н.п. Дублин Брагинского района Гомельской области

[Table 2

²⁴¹Am and accompanying ¹³⁷Cs contents in the soil of the farmlands of Dublin village of Bragin district, Gomel region]

Населенный пункт [Village]	²⁴¹ Am		¹³⁷ Cs	
	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]
Дублин 1 [Dublin 1]	4,1±0,7	0,97	328±41	77
Дублин 2 [Dublin 2]	5,6±1,1	1,17	418±53	87
Дублин 3 [Dublin 3]	2,1±0,6	0,48	234±29	54
Дублин 4 [Dublin 4]	4,8±1,1	0,98	462±58	94
Дублин 5 [Dublin 5]	5,9±1,2	1,36	406±51	94

Таблица 3
Содержание ^{241}Am и сопутствующего ^{137}Cs в почве и продуктах питания подворий н.п. Соболи Брагинского района Гомельской области

[Table 3
 ^{241}Am and accompanying ^{137}Cs contents in the soil and foodstuffs of the farmlands of Soboli village of Bragin district, Gomel region]

Населенный пункт [Village]	Продукт [foodstuffs]	^{241}Am почва* [soil]		^{241}Am продукт* [foodstuffs]		^{137}Cs почва* [soil]		^{137}Cs продукт* [foodstuffs]	
		Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	мБк/кг [mBq/kg]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]		
Соболи 1 [Soboli 1]		6,7±1,8	1,4	–		1130±140	240	–	
Соболи 2 [Soboli 2]	Не отбирались [Not selected]	6,5±1,8	1,4	–		530±100	120	–	
Соболи 3 [Soboli 3]		7,2±2,2	1,2	–		1570±200	270	–	
Соболи 4 [Soboli 4]	Картофель [Potatoes]	8,9±1,2	1,4	2,0±0,5		990±130	160	3,8±0,9	
	Листовой салат [Leaf salad]	9,2±2,3	1,4	13,1±2,5		1120±140	170	3,3±1,1	
	Лук (перо) [Onion feather]	9,2±2,3	1,4	2,8±0,8		1120±140	170	2,7±0,9	
Соболи 5 [Soboli 5]	Свекла [Beet]	7,3±2,0	1,3	3,7±0,7		1570±200	270	2,7±0,4	
	Картофель [Potatoes]	7,3±2,0	1,3	5,1±1,0		1570±200	270	2,8±0,4	
	Листовая петрушка [Leaf parsley]	16,3±3,2	3,6	33,3±6,0		1340±170	300	11,7±2,2	
	Листовой салат [Leaf salad]	7,1±1,5	1,3	19,6±3,1		1150±140	210	3,2±1,2	
	Лук (перо) [Onion feather]	7,1±1,5	1,3	3,0±0,8		1150±140	210	2,7±0,9	

*Удельная активность радионуклидов в почве определена на воздушно-сухую массу, в продуктах – на натуральную массу. [The specific activity of radionuclides in the soil is determined by the air-dry weight, in the products – by the natural weight].

Самые высокие уровни содержания ^{241}Am в почве (см. табл. 3) отмечены на подворьях населенного пункта Соболи. Поэтому на подворьях указанного населенного пункта были также отобраны и продукты питания для установления возможного содержания в них ^{241}Am .

Продукты питания отбирались только на подворье 3 группы, где были установлены максимальные уровни содержания ^{241}Am в почве. Расположение населенных пунктов относительно границ земель выведенных из использования (радиологический заповедник) и Чернобыльской АЭС представлены на рисунке. Расстояние от ЧАЭС до н.п. Дублин – 43 км, до н.п. Соболи – 46 км, до н.п. Микуличи – 52 км.

Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что в н.п. Микуличи при достаточно высоком уровне загрязнения почвы подворий сопутствующим ^{137}Cs на четырех из семи подворий уровни содержания ^{241}Am в почве меньше минимально-детектируемой активности, даже с учетом погрешности удельная активность ^{241}Am в почве подворий н.п. Микуличи не превышает уровень 5 Бк/кг. Иная картина наблюдается на подворьях в н.п. Дублин

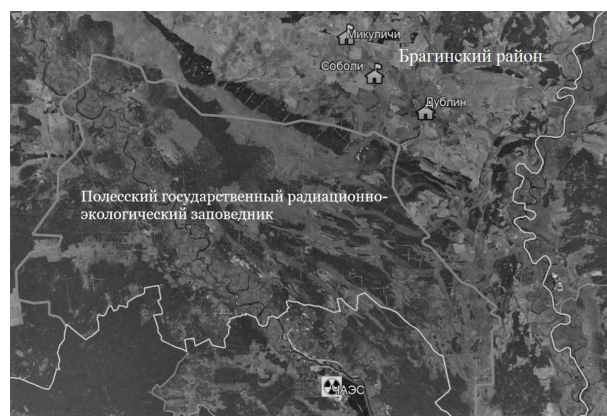


Рис. Расположение на космическом снимке населенных пунктов Микуличи, Соболи, Дублин Брагинского района Гомельской области относительно отселенных территорий (радиационно-экологический заповедник) и Чернобыльской АЭС [Fig. Location on the satellite image of Mikulichi, Soboli, Dublin settlements of Bragin area of Gomel region relative to the resettled areas (radiological reserve) and the Chernobyl nuclear power plant]

(табл. 2): установлены относительно меньшие (по сравнению с н.п. Микуличи) – до 10 раз уровни загрязнения почвы сопутствующим цезием, при этом удельная активность ^{241}Am в почве этих подворий с учетом погрешности не превышает уровень 10 Бк/кг.

Сравнительный анализ современных уровней содержания ^{241}Am и сопутствующего ^{137}Cs в почве трех населенных пунктов Брагинского района (см. табл. 1–3) показывает, что отсутствует прямая зависимость между данными радионуклидами – самые низкие уровни америция 0,5–0,8 кБк/м² в почве подворий наблюдаются в н.п. Микуличи, где отмечены самые высокие уровни цезия, достигающие 350 кБк/м². Если с учетом содержания ^{241}Am в почве подворий населенные пункты образуют возрастающий ряд: Микуличи→Дублин→Соболи, то по содержанию ^{137}Cs аналогичный ряд возрастания выглядит иначе: Дублин→Соболи→Микуличи. Не отмечается какая-либо корреляция между загрязнением ^{241}Am и ^{37}Cs почвы рассматриваемых населенных пунктов и расстоянием до ЧАЭС (см. рис.).

Данные таблицы 3 свидетельствуют о том, что в населенном пункте Соболи на одном из участков частного подворья (Соболи 5) с учетом объемной плотности сложения почвы установлено максимальное (принимая во внимание населенные пункты Брагинского района) присутствие ^{241}Am в почве – 3,6 кБк/м². На других участках этого же подворья содержание ^{241}Am оказалось в три раза меньше и составило 1,3 кБк/м², что соответствует средней величине плотности загрязнения америцием почвы по всем обследованным подворьям населенных пунктов Брагинского района.

Принимая во внимание средний уровень глобальных выпадений на почвенный покров Республики Беларусь $^{239+240}\text{Pu} \sim 60$ Бк/м² [4,5], можно заключить, что уровни современного загрязнения почвы ^{241}Am Брагинского района Гомельской области на отдельных участках территории до 100 раз могут превышать дочернобыльский фон глобального загрязнения по плутонию.

Представлялось важным определить, какое загрязнение ^{241}Am растительной продукции из личных подворий может быть сопряжено с установленными уровнями содержания этого радионуклида в почве. Анализ литературных источников показал, что основное содержание америция в пробах картофеля может быть связано с кожурой [6], а листовая поверхность в пробах зеленных культур может быть носителем как поверхностного, так и корневого загрязнения радионуклидами [7, 8].

Результаты определения удельной активности ^{241}Am и сопутствующего ^{137}Cs в растительной продукции, получаемой населением на личных подворьях, представлены в таблице 3. Максимальная удельная активность ^{241}Am в продуктах питания на уровне 10–30 миллибеккерелей в 1 кг натурального продукта установлена в пробах листовой зелени петрушки (33,3 мБк/кг) и листового салата (19,6 мБк/кг). В пробах картофеля, свеклы, лука (перо) удельная активность ^{241}Am находилась в пределах 2–5 мБк/кг. При этом содержание сопутствующего ^{137}Cs в пробах данной растительной продукции (см. табл. 3) установлено в диапазоне 3–12 беккерелей на 1 кг натурального продукта, что на три порядка величины превышает содержание ^{241}Am .

На основании фактических данных об уровнях современного загрязнения ^{241}Am и сопутствующим ^{137}Cs почвы и продуктов питания, получаемых населением на личном подворье, в соответствии с рекомендациями [9, 10] выполнена оценка максимальной ожидаемой годовой дозы внутреннего облучения от ^{241}Am и ^{137}Cs для жителей одного из подворий Брагинского района (Соболи 5) с учетом поступления при ингаляции и по пищевой цепочке (табл. 4).

Расчет ожидаемой дозы внутреннего облучения при ингаляции произведен, исходя из предположения, что жители подворья выполняют сельскохозяйственные работы на приусадебном участке 4 ч в день (2 ч утром, 2 ч вечером – согласно опросам населения) в течение 7 месяцев.

В расчетах оценки ожидаемой дозы внутреннего облучения по пищевой цепочке консервативно принималось, что все основные компоненты рациона (картофель, зелень, овощи, фрукты и ягоды, молоко, мясо, яйца) население получает на личном подворье. 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 [11,12].

Таким образом, оценка ожидаемой дозы внутреннего облучения путем ингаляции на примере одного из подворий Брагинского района Гомельской области показала, что при выполнении населением работ на личном подворье в н.п. Соболи доза от ингаляционного поступления америция составляет $3,3 \times 10^{-2}$ мЗв/год (3% от предела средней годовой эффективной дозы облучения населения в ситуации планируемого облучения – 1 мЗв/год (Критерии оценки радиационного воздействия: Гигиенический нор-

Таблица 4

Оценка максимальной ожидаемой дозы внутреннего облучения от ^{241}Am и сопутствующего ^{137}Cs на частном подворье Соболи 5, мЗв/год

[Table 4

Estimation of the maximum expected internal dose from ^{241}Am and accompanying ^{137}Cs at the Soboli 5 farmland, mSv / year]

^{137}Cs			^{241}Am		
Пищевая цепочка [food chain]	Ингаляция [inhalation]	Сумма [total]	Пищевая цепочка [food chain]	Ингаляция [inhalation]	Сумма [total]
$8,21 \times 10^{-1}$	$1,04 \times 10^{-3}$	$8,22 \times 10^{-1}$	$1,28 \times 10^{-3}$	$3,32 \times 10^{-2}$	$3,45 \times 10^{-2}$

матив Республики Беларусь. 2013. 8/26850 [Criteria for estimating radiation exposure: Hygienic standard. Registered at the National register of legal acts of the Republic of Belarus, registration number 2013/8/2650. (In Russ.)]. В то же время доза при ингаляционном пути поступления сопутствующего ^{137}Cs на этом подворье – $1,0 \times 10^{-3}$ мЗв/год, что составляет только 0,1% от указанного дозового предела.

Как следует из данных таблицы 4, в суммарной ожидаемой дозе внутреннего облучения от ^{241}Am жителей подворья преобладает доля ингаляционной составляющей, тогда как пероральный путь поступления является доминирующим в формировании суммарной ожидаемой дозы внутреннего облучения от ^{137}Cs .

Однако на современном этапе продолжает превалировать (более чем в 20 раз относительно ^{241}Am) суммарная доза внутреннего облучения, которую население получает от поступления ^{137}Cs . Принимая во внимание результаты опроса жителей, согласно которым, они не производят на своем подворье мясо-молочную продукцию, можно заключить, что реальная доза от поступления радионуклидов по пищевой цепочке будет ниже, чем консервативно оцененная доза.

Заключение

Установлено, что при среднем уровне $1,3 \text{ кБк/м}^2$ максимальная плотность современного загрязнения почвы ^{241}Am на территории частных подворий населенных пунктов Брагинского района может достигать $3,6 \text{ кБк/м}^2$. Плотность загрязнения почвы этой территории для сопутствующего ^{137}Cs на 1–2 порядка величины выше и варьирует в пределах от 50 кБк/м^2 до 350 кБк/м^2 . Принимая во внимание средний уровень глобальных выпадений на почвенный покров Республики Беларусь $^{239+240}\text{Pu} \sim 60 \text{ Бк/м}^2$, можно заключить, что уровни современного загрязнения почвы ^{241}Am Брагинского района Гомельской области на отдельных участках территории до 100 раз могут превышать дочернобыльский фон глобального загрязнения по плутонию.

Максимальная удельная активность ^{241}Am в продуктах на частном подворье установлена в пробах листовой зелени петрушки – 33 мБк/кг , а в пробах картофеля, свеклы, лука (перо) удельная активность ^{241}Am не превышала 5 мБк/кг . При этом содержание сопутствующего ^{137}Cs в пробах растительной продукции находилось в пределах $3\text{--}12 \text{ Бк/кг}$, что на три порядка величины выше, чем содержание ^{241}Am .

В суммарной ожидаемой дозе внутреннего облучения от ^{241}Am жителей подворья преобладает ингаляционная составляющая, тогда как пероральный путь поступления является доминирующим в формировании суммарной ожидаемой дозы внутреннего облучения от ^{137}Cs .

Оценка доз облучения показала, что при выполнении населением работ на одном из личных подворий доза от ингаляционного поступления ^{241}Am составляет $3,3 \times 10^{-2}$ мЗв/год (3% от от предела средней годовой эффективной дозы

облучения населения в ситуации планируемого облучения – 1 мЗв/год). В то же время доза при ингаляционном пути поступления сопутствующего ^{137}Cs на данном подворье – $1,0 \times 10^{-3}$ мЗв/год, что составляет только 0,1% от указанного дозового предела

На современном этапе продолжает превалировать (более чем в 20 раз относительно ^{241}Am) суммарная доза внутреннего облучения, которую население получает от поступления ^{137}Cs .

Литература

1. Конопля, Е.Ф. Радиация и Чернобыль: Трансурановые элементы на территории Беларуси / Е.Ф. Конопля, В.П. Кудряшов, В.П. Миронов. – Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2007. – 128 с.
2. 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.
3. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь) / Под ред. Ю.А. Израэля и И.М. Богдевича. – Москва-Минск: Фонд «Инфосфера»; НИА-Природа, 2009. – 140 с.
4. Лебедев, И.А. Содержание плутония в почвах Европейской части страны после аварии на Чернобыльской АЭС / И.А. Лебедев, Б.Ф. Мясоедов, Ф.И. Павлоцкая, В.Я. Френкель // Атомная энергия. – 1992. – Т. 22, вып. 6. – С. 593-599.
5. Тагай, С.А. Содержание и распределение ^{241}Am в почве юга Гомельской области / С.А. Тагай // Природные ресурсы. – 2007. – №3. – С. 63-69.
6. Апплби, Л.Дж. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля / Л.Дж. Апплби и [др.]; пер. с англ., под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона. – М.: Мир, 1999. – 512 с.
7. Павлоцкая, Ф.И. Поведение трансплутониевых элементов в окружающей среде / Ф.И. Павлоцкая, Ю.И. Поспелов, Б.Ф. Мясоедов, Ю.В. Кузнецов, В.К. Легин // Радиохимия. – 1991. – № 5. – С. 112–119.
8. Аверин, В.С. Америций и плутоний в агроэкосистемах. Чернобыльская катастрофа 1986 года / В.С. Аверин, А.Г. Подоляк, С.А. Тагай, А.Б. Кухтевич, К.Н. Буздалькин, А.А. Царенок, Е.К. Нилова. – РНИУП «Институт радиологии». Мн., 2014. – 176 с.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

Поступила: 11.05.2019 г.

Нилова Екатерина Константиновна – кандидат биологических наук, научный сотрудник государственного научного технического учреждения «Центр по ядерной и радиационной безопасности» МЧС 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 НАНБ, Гомель, Беларусь. **Адрес для переписки:** 246000, Гомель, ул. Федюнинского, д. 16, Tel.: 8 10 (375 44) 724 19 42, E-mail: lanabuz@tut.by

Дударева Наталья Владимировна – научный сотрудник Института радиобиологии НАНБ, Гомель, Беларусь

Жукова Людмила Викторовна – научный сотрудник Института радиобиологии НАНБ, Гомель, Беларусь

Для цитирования: Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., Дударева Н.В., Жукова Л.В. ²⁴¹Am 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.

²⁴¹Am on the territories adjacent to the Belarusian sector of the Chernobyl NPP resettlement zone: soil contamination, foodstuffs and population internal dose assessment

Ekaterina K. Nilova ¹, Vladimir N. Bortnovsky ², Svetlana A. Tagai ³, Natalia V. Dudareva ³, Lyudmila V. Zhukova ³

¹ Center for Nuclear and Radiation Safety Ministries of 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

²⁴¹Am is the only radionuclide of Chernobyl radioactive fallout the content of which until 2058 continues to increase. The purpose of this work is to assess the ²⁴¹Am internal exposure doses of residents of settlements on the territory adjacent to the resettlement lands of the Chernobyl nuclear power plant. To achieve this goal the current levels of ²⁴¹Am and accompanying ¹³⁷Cs content in the soil and foodstuffs were determined at the private settlements of the Bragin district of Gomel region of Belarus. ²⁴¹Am (E 59.6 keV) content in soil samples and ¹³⁷Cs (E 661 keV) content in soil/food samples were determined by gamma spectrometry. Determination of ²⁴¹Am specific activity in food samples was performed by the radiochemical method using selective extraction-chromatographic resins. With an average level of 1.3 kBq/m², the maximum soil contamination density of ²⁴¹Am can reach 3.6 kBq/m², and for ¹³⁷Cs it is one or two orders of magnitude higher and ranges from 50 kBq/m² to 350 kBq/m². The maximum specific activity of ²⁴¹Am in products is determined in samples of leafy parsley – 33 mBq/kg, and in samples of potatoes, beets, onions per feather – not exceed 5 mBq/kg. The content of accompanying ¹³⁷Cs in samples of plant products is in the range of 3-12 Bq/kg. In estimation of the internal dose of exposure by the food chain it is conservatively assumed that the population receives all the main components of the diet in their own farmstead. Calculation of the dose of internal exposure during inhalation is made under the assumption that the population performs work in the garden 4 hours a day for 7 months. The total expected dose of internal exposure from ²⁴¹Am residents of settlements is dominated by the inhalation component, while the oral route is dominant in the formation of the total dose of internal exposure from concomitant ¹³⁷Cs, which is 20 or more times higher than ²⁴¹Am.

Key words: ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, density of soil contamination, specific activity, population, food, inhalation, dose of internal exposure.

References

1. Konoplia E.F., Kudriashov V.P., Mironov V.P. Radiation and Chernobyl: Transuranic elements on the Belarus territory, Gomel: RNIUP «Institute Radiologii», 2007, 128 p. (In Russian).
2. 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.
3. Atlas of current and future effects of the Chernobyl accident on affected parts of the Russian Federation and Belarus (ACFE Russia-Belarus). Eds.: Yu.A. Israel and I.M. Bogdevich. Moscow-Minsk: Foundation «Infosfera», NIA Priroda, 2009, 140 p. (In Russian).

Svetlana A. Tagai

Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus

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

4. Lebedev I.A., Myasoyedov B.F., Pavlotskaya F.I., Frenkel V.Ya. The content of plutonium in the soils of the European part of the country after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*, 1992, 22(6): 593-599 (In Russian).
5. Tagai S.A. Content and distribution of ²⁴¹Am in the soil of the southern part of the Gomel region. *Prirodnye-resursy = Natural resources*, 2007, 3: 63-69. (In Russian).
6. Ways of migration of artificial radionuclides in the environment. *Radioecology after Chernobyl*. Ed. by Frederick Warner and Roy M. Harrison. Moscow: «Mir», 1999, 512 p. (In Russian).
7. Pavlotskaya F.I., Pospelov Yu.I., Myasoyedov B.F., Kuznetsov Yu.V., Legin V.K. The behavior of transplutonium elements in the environment. *Radiokhimiya = Radiochemistry*, 1991, 5: 112–119. (In Russian).
8. Averin V.S., Podolyak A.G., Tagai S.A., Kukhtevich A.B., Buzdalkin K.N., Tsarenok A.A., Nilova E.K. Americium and plutonium in agroecosystems. 1986 Chernobyl disaster. Gomel: RNIUP «Institute Radiologii», 2014, 176 p. (In Russian).
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

Received: May 11, 2019

Ekaterina K. Nilova – Candidate of Biological Sciences, Researcher of Center for Nuclear and Radiation Safety Ministries of 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 of the Gomel State Medical University, Gomel, Belarus.

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

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

Lyudmila V. Zhukova – Researcher of Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

For citation: Nilova E.K., Bortnovsky E.V., Tagai S.A., Dudareva N.V., Zhukova L.V. ²⁴¹Am 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, Vol. 12, No. 2 (special issue), pp. 75-82. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2s-75-82.