

Мощность амбиентного эквивалента дозы и плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах в населенных пунктах Брянской области России в 2020–2021 гг.

В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский, А.А. Братилова

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

В статье рассмотрены результаты применения метода полевой (in situ) гамма-спектрометрии при проведении массовых мониторинговых измерений мощности амбиентного эквивалента дозы и плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородных участках, расположенных в зоне радиоактивного загрязнения после аварии на ЧАЭС. В 2020–2021 гг. было обследовано 115 частных подворий в 46 населенных пунктах Брянской области. На время проведения этих обследований официально установленная средняя плотность загрязнения почвы ^{137}Cs в населенных пунктах находилась в диапазоне от 27 до 533 кБк/м². Измерение полевых спектров проводили с использованием портативного сцинтилляционного гамма-спектрометра-дозиметра. Полученные результаты натурных измерений и последующих вычислений плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах хорошо соответствовали официальным данным о средней плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в обследованных населенных пунктах. Среднее значение соотношения экспериментальных и официальных данных было равно 1,04. Индивидуальные значения экспериментальных значений отклонялись от соответствующих официальных значений не более чем в 2 раза. Применение метода полевой гамма-спектрометрии позволило отдельно определить мощность амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs и от природных радионуклидов, а также оценить соответствующие эффективные дозы внешнего облучения человека в случае его пребывания на огородном участке. Значения мощности амбиентного эквивалента дозы варьировали от 13 до 53 нЗв/ч (средняя $\pm$ стандартное отклонение = 35 ± 9 нЗв/ч) для природных радионуклидов и от 8 до 432 нЗв/ч (средняя $\pm$ стандартное отклонение = 125 ± 91 нЗв/ч) для ^{137}Cs . Значение мощности амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs , определенное для конкретного огородного участка и нормализованное на плотность загрязнения ^{137}Cs почвы того же самого участка, находилось в диапазоне от 0,41 до 0,84 (нЗв/ч)/(кБк/м²) при средней величине 0,55 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Вычисленные значения эффективной дозы внешнего облучения лежали в диапазоне от 0,008 до 0,025 мЗв/год для природных радионуклидов и от 0,004 до 0,20 мЗв/год для ^{137}Cs при условии нахождения человека на огороде 840 ч в год.

Ключевые слова: Чернобыльская авария, почва, огород, ^{137}Cs , плотность загрязнения, мощность амбиентного эквивалента дозы, in situ, гамма-спектрометрия.

Введение

Огороды (небольшие участки постоянно культивируемой земли, находящейся в индивидуальной собственности) весьма типичны для сельских населенных пунктов (НП) в зоне чернобыльского загрязнения в России и Беларуси. Огороды встречаются повсеместно также в местах одноэтажной частной жилой застройки в городах, подвергшихся радиоактивному загрязнению (например, г. Новозыбков и г. Клинцы в Брянской области в России; г. Ветка Гомельской области в Беларуси). Как правило, огороды расположены в непосредственной близости от жилых домов собственников приусадебных участков.

Огороды используются собственниками для выращивания разнообразных видов сельскохозяйственных растений, в основном, с целью последующего личного употребления в пищу и откорма домашних животных. Техногенные радионуклиды, присутствующие в продуктах из личных подсобных хозяйств, вносят определенный вклад в дозу внутреннего облучения местного населения [1–3]. Кроме того, в процессе выполнения работ на огородах владельцы участков неизбежно подвергаются воздействию гамма-излучения, исходящего от присутствующих в огородной почве техногенных (в настоящее время – ^{137}Cs) и природных радионуклидов [3–5]. Поэтому

Рамзаев Валерий Павлович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева
Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

при мониторинге доз облучения населения на радиоактивно загрязненных территориях огород является обязательной локацией для проведения измерений мощности дозы гамма-излучения в воздухе (МД)¹. При этом огород может также использоваться в качестве референтной локации для определения плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs (A_{Cs} , кБк/м²) в НП и вычисления нормализованной на A_{Cs} величины МД от ¹³⁷Cs в таких локациях, как сам огород, жилой дом, двор и улица [4]. В совокупности эти локации представляют собой жилую зону НП. Именно здесь человек проводит основную часть своей жизни [6].

Летом 2020 и 2021 гг. в ходе выполнения «Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС (2019–2022)» [http://www.postkomsg.com/programs], ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева провел экспедиционные обследования НП Брянской области по оценке средних годовых эффективных доз облучения населения, проживающего на приграничных территориях радиоактивного загрязнения России и Беларуси.

Цель исследования – экспериментальное установление нормализованной (на A_{Cs}) мощности амбиентного эквивалента дозы для огородов, расположенных в жилой зоне НП.

Задачи исследования

1. Измерить общую мощность амбиентного эквивалента дозы ($ADER$, нЗв/ч).
2. Определить мощность амбиентного эквивалента дозы от терригенных (природных) радионуклидов ($ADER_{TRN}$, нЗв/ч).

Официально установленная средняя плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs (A_{Cs-off}) в населенных пунктах Брянской области и число огородных участков, обследованных в 2020–2021 гг. с использованием дозиметра-спектрометра MKS AT6101D

[Table 1]

The officially established average value of soil contamination density with ¹³⁷Cs (A_{Cs-off}) in the settlements of the Bryansk region, and the number of kitchen garden plots surveyed in 2020–2021 using the dosimeter-spectrometer MKS AT6101D

Населенный пункт [Settlement]	A_{Cs-off} , Ки/км ² (на 01.01.2017 г.) [A_{Cs-off} , Ci/km ² (as of 01.01.2017)] *	A_{Cs-off} , кБк/м ² (на день измерений) [A_{Cs-off} , kBq/m ² (on the day of measurements)] **	Число участков [Number of plots]
Гордеевский район [Gordeevka district]			
Глинное [Glinnoe]	3,8	129	1
Гордеевка [Gordeevka]	12,5	426	6
Перетин [Peretin]	9,3	310	2
Поконь [Pokon']	6,2	211	1
Рудня-Воробьевка [Rudnya-Vorobyovka]	11,0	366	4
Смяльч [Smyalch]	10,1	336	2
Староновицкая [Staronovitskaya]	12,7	423	2
Стругова Буда [Strugova Buda]	4,9	167	6
Творишино [Tvorishino]	10,5	350	2
Ширяевка [Shiryaevka]	14,1	469	2

¹ ГОСТ Р 22.11.09-2014. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Безопасность жизнедеятельности населения на радиоактивно загрязненных территориях. Мониторинг доз облучения населения. Общие требования. [GOST R 22.11.09-2014. Safety in emergency. Human life safety of population on radioactive nuclide contaminated areas. Monitoring radiation doses. Basic requirements. (In Russ.)]

Радиационные измерения

Окончание таблицы 1

Населенный пункт [Settlement]	A_{Cs-off} , Ки/км ² (на 01.01.2017 г.) [A_{Cs-off} , Ci/km ² (as of 01.01.2017)] *	A_{Cs-off} , кБк/м ² (на день измерений) [A_{Cs-off} , kBq/m ² (on the day of measurements)] **	Число участков [Number of plots]
Злынковский район [Zlynka district]			
Большие Щербиничи [Bolshie Shcherbinichi]	8,5	283	2
Денисковичи [Deniskovich]	9,5	324	2
Злынка [Zlynka]	13,8	470	4
Карпиловка [Karpilovka]	8,0	272	1
Кожановка [Kozhanovka]	1,0	33	2
Рогов [Rogov]	6,6	220	2
Софиевка [Sofiyivka]	9,3	310	2
Спиридонова Буда [Spiridonova Buda]	7,6	253	2
Климовский район [Klimovo district]			
Ивановка [Ivanovka]	1,6	53	2
Рудня-Цата [Rudnya-Tsata]	1,7	57	2
Старые Юрковичи [Starie Yurkovichi]	0,8	27	2
Фоевичи [Foevichi]	3,6	120	2
Чуровичи [Churovichi]	3,9	130	3
Клинцовский район [Klincy district]			
Великая Топаль [Velikaya Topal']	3,1	106	6
Вьюнка [V'yunka]	1,1	37	2
Гута-Корецкая [Guta-Koretskaya]	7,2	240	2
Дровосеки [Drovoseki]	4,5	153	1
Коржовка-Голубовка [Korzhovka-Golubovka]	1,1	37	2
Красный Мост [Krasnyy Most]	5,9	201	1
Лопатни [Lopatni]	3,3	110	2
Малая Топаль [Malaya Topal']	3,8	129	6
Мизиричи [Mizirichi]	0,9	30	2
Сосновка [Sosnovka]	1,2	40	2
Красногорский район [Krasnaya Gora district]			
Даниловка [Danilovka]	2,5	85	1
Дубенец [Dubenets]	8,7	296	2
Дубрежка [Dubrezhka]	3,2	109	2
Колюды [Kolyudy]	3,0	102	2
Красная Гора [Krasnaya Gora]	4,1	140	2
Кургановка [Kurganovka]	3,2	109	2
Ларневск [Larnevsk]	3,1	103	3
Лотаки [Lotaki]	3,3	110	2
Непобедимый [Nepobedimyy]	2,7	92	2
Селец [Selets]	7,1	242	2
Новозыбковский район [Novozybkov district]			
Деменка [Demenka]	16,0	533	3
Новозыбков [Novozybkov]	10,0	341	7
Перевоз [Perevoz]	13,7	456	3

* – по данным работы Г.Я. Брук и др. [7];

** – вычислено на основании данных работы Г.Я. Брук и др. [7] с учетом радиоактивного распада ¹³⁷Cs.

[* – according to Bruk et al. [7];

** – calculated on the basis of data by Bruk et al. [7] taking into account the radioactive decay of ¹³⁷Cs.]

Измерения были проведены на огородах 115 частных подворий. Хозяева огородов незадолго до наших обследований приступили к уборке урожая. Поэтому, наряду с пятнами оголенной почвы, на огородах присутствовали места, покрытые весьма толстым слоем биомассы (рис. 1). Количество обследованных подворий в НП варьировало от 1 до 7 (см. табл. 1), что в какой-то мере было связано с общим числом жилых подворий в конкретном НП. Как правило, в маленьких поселках мы обследовали 1 или 2 подворья.



Рис. 1. Гамма-спектрометрические измерения *in situ* на огородном участке Per-9 в НП Денисовичи. Прибор МКС АТ6101Д размещен на треножке. Август 2020 г.

[Fig. 1.] *In situ* gamma-ray spectrometric measurement in the kitchen garden plot Per-9 in the settlement Deniskovich. The MKS AT6101D device is placed on the tripod. August 2020]

Измерения полевых (*in situ*) спектров проводили с использованием портативного гамма-спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д (фирма АТОМТЕХ, Беларусь) [8]. Детектор спектрометра размещали на алюминиевом треножке на высоте 1 м над поверхностью земли (см. рис. 1). Энергетическую калибровку спектрометра проводили с помощью точечного источника ^{137}Cs после каждого включения прибора. Детали описания спектрометра и его калибровки приведены в работах [9–11].

Продолжительность набора полевых спектров находилась в диапазоне от 246 до 1824 с (средняя = 780 с). Для обработки полученных спектров использовали программу ATAS-Lite (АТОМТЕХ). С помощью этой программы были вычислены значения удельной активности ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в почве, а также удельной эффективной активности [12] этих природных радионуклидов ($A_{\text{эфф}}$)². Кроме того, были определены значения АДЕР и вычислены значения скорости счета в фотопике с энергией 662 кэВ (PAR_{662} , имп./с). Величина АДЕР включала в себя вклады от природных (терригенных) радионуклидов, техногенных радионуклидов (в данном случае – ^{137}Cs) и космического излучения, а также собственный фон прибора. Раздельное

определение значений мощности AMBIENTного эквивалента дозы от природных радионуклидов (ADER_{TRN}) и от суммы первичных фотонов (энергия = 662 кэВ) и рассеянных фотонов (энергия <662 кэВ) от $^{137}\text{Cs} + ^{137m}\text{Ba}$ ($\text{ADER}_{\text{Cs-tot}}$) проводили в соответствии с методом, изложенным в работе [9]. Мощность AMBIENTного эквивалента дозы от первичных фотонов с энергией 662 кэВ ($\text{ADER}_{\text{Cs-prim}}$) вычисляли посредством умножения PAR_{662} на коэффициент конверсии, равный 1,25 (нЗв/ч)/(имп./с) [10].

Результаты спектрометрических измерений, проведенных *in situ*, использовали для вычисления плотности загрязнения почвы огородов ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-in-situ}}$) в соответствии с методом BUFCS, предложенным Ramzaev et al. [11]. Данный метод был валидирован (т.е. была выполнена оценка его пригодности) с помощью лабораторного гамма-спектрометрического анализа (метод *ex situ*) содержания ^{137}Cs в почвенных пробах, отобранных послойно на 10 представительных огородных участках [13]. В этом исследовании было установлено, что вычисленные с помощью метода BUFCS значения A_{Cs} хорошо согласуются с результатами лабораторных анализов проб почвы. Среднее соотношение значений A_{Cs} , определенных *in situ* и *ex situ*, было равно 1,07 (диапазон 0,93–1,20).

Вычисления $A_{\text{Cs-in-situ}}$ проводили в 3 этапа [11]. Вначале был определен фактор накопления AMBIENTного эквивалента дозы от ^{137}Cs (BUF_{Cs} , безразмерная величина), представляющий собой отношение $\text{ADER}_{\text{Cs-tot}}$ к $\text{ADER}_{\text{Cs-prim}}$. На втором этапе вычисляли коэффициент перехода от $\text{ADER}_{\text{Cs-prim}}$ к $A_{\text{Cs-in-situ}}$ с помощью эмпирической формулы, выведенной для открытых земляных участков [11]:

$$CC_{\text{BUF}} = a \times \exp(b \times \text{BUF}_{\text{Cs}}), \quad (1)$$

где CC_{BUF} – коэффициент преобразования $\text{ADER}_{\text{Cs-prim}}$ в $A_{\text{Cs-in-situ}}$ ((кБк/м²)/(нЗв/ч)); a – эмпирический коэффициент (0,102 (кБк/м²)/(нЗв/ч)); b – эмпирический коэффициент, равный 1,425 (безразмерная величина); BUF_{Cs} – дозовый фактор накопления (безразмерная величина).

На третьем этапе, используя измеренное значение $\text{ADER}_{\text{Cs-prim}}$ и рассчитанное значение CC_{BUF} , вычисляли значение плотности загрязнения почвы ($A_{\text{Cs-in-situ}}$, кБк/м²) обследованного огорода:

$$A_{\text{Cs-in-situ}} = \text{ADER}_{\text{Cs-prim}} \times CC_{\text{BUF}}. \quad (2)$$

В дополнение к оценке A_{Cs} параметр BUF_{Cs} был использован для оценки средней глубины миграции ^{137}Cs в почве (параметр Z_{Cs} , г/см²). Зависимость между BUF_{Cs} и Z_{Cs} описывается эмпирически выведенным линейным уравнением [11]:

$$Z_{\text{Cs}} = c \times \text{BUF}_{\text{Cs}} - d, \quad (3)$$

где c – эмпирический коэффициент (12,9 г/см²); d – эмпирический коэффициент (21,0 г/см²).

Следует отметить, что метод BUFCS имеет два ограни-

² ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. Введен в действие с 1 января 1995 г. в качестве государственного стандарта Российской Федерации Постановлением Госстроя России от 30 июня 1994 г. № 18–48. [ГОСТ 30108-94. Building materials and elements. Determination of specific activity of natural radioactive nuclides. Gosstroy rossii; Moscow, 1995. (In Russ.)]

чения по условиям его разработки и валидации [11]. Во-первых, значение $BUFCs$ должно находиться в пределах диапазона 1,76–2,96. Во-вторых, оцененное или измеренное значение A_{Cs} должно превышать 37 кБк/м².

Результаты и обсуждение

Присутствие четко выраженного пика с энергией 662 кэВ (от $^{137}Cs-^{137m}Ba$) было обнаружено на всех полевых спектрах на огородах (рис. 2). На спектрограммах также можно было идентифицировать характерные пики терригенных (природных) радионуклидов ^{214}Bi (семейство ^{226}Ra), ^{208}Tl (семейство ^{232}Th) и ^{40}K .

Результаты статистической обработки полученных экспериментальных данных приведены в таблице 2. Значения $ADER$ находились в диапазоне от 32 до 461 нЗв/ч при среднем значении 168 нЗв/ч. Статистическая неопределенность измерения $ADER$ во всех случаях не превышала 2% с 95% вероятностью. Значения $ADER_{TRN}$ варьировали от 17 до 53 нЗв/ч (средняя ± стандартное отклонение = 35 ± 9 нЗв/ч). Статистическая неопределенность вычисления $ADER_{TRN}$ находилась в диапазоне 9–23% и в среднем равнялась 13%.

Разброс значений $ADER_{Cs-tot}$ был достаточно широким: от 8 до 432 нЗв/ч (средняя ± стандартное отклонение = 125 ± 91 нЗв/ч). Вклад $ADER_{Cs-tot}$ в $ADER$ колебался от 17 до 94% при средней величине 66%. Чернобыльская компонента доминировала в общей мощности дозы гамма-излучения в воздухе 95 из 115 в обследованных участков. В среднем вклад первичных (нерассеянных) гамма-квантов от источника ^{137}Cs в $ADER_{Cs-tot}$ составил 36% (диапазон 27–47%). Величина $BUFC_{Cs}$ находилась в диапазоне 2,12–3,75 (средняя = 2,77). На 13 участках значения $BUFC_{Cs}$ выходили за пределы диапазона, опробованного при разработке метода $BUFCs$ (1,76–2,96) [11, 13]. Кроме того, еще на 10 участках ожидаемая или/и оце-

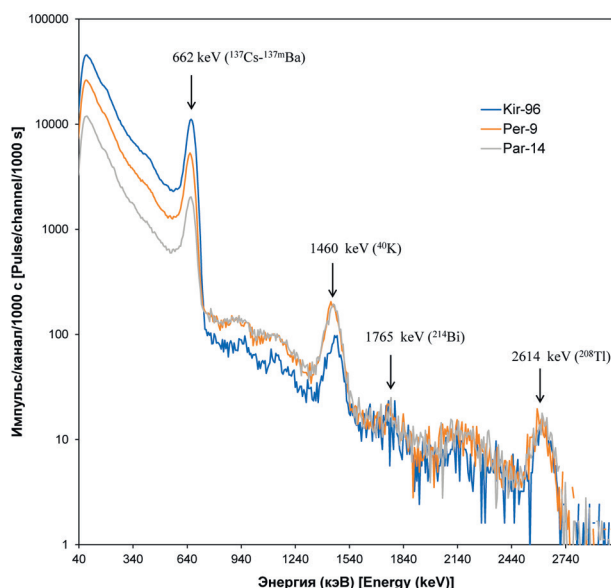


Рис. 2. Гамма-спектры, полученные *in situ* с помощью МКС АТ6101Д на огородах в населенных пунктах Злынка (участок Kir-96; $A_{Cs-in situ} = 506$ кБк/м²), Денисовичи (участок Per-9; $A_{Cs-in situ} = 282$ кБк/м²) и Красная Гора (участок Par-14; $A_{Cs-in situ} = 81$ кБк/м²) в августе 2020 г. Положения пиков антропогенного радионуклида ^{137}Cs и терригенных (природных) радионуклидов ^{214}Bi (семейство ^{226}Ra), ^{208}Tl (семейство ^{232}Th) и ^{40}K обозначены стрелками [Fig. 2. *In situ* gamma-ray spectra recorded with MKS AT6101D in kitchen gardens in the settlements Zlynka (plot Kir-96; $A_{Cs-in situ} = 506$ kBq/m²), Deniskovichy (plot Per-9; $A_{Cs-in situ} = 282$ kBq/m²) and Krasnaya Gora (plot Par-14; $A_{Cs-in situ} = 81$ kBq/m²) in August 2020. The positions of peaks associated with the anthropogenic radionuclide ^{137}Cs and the terrigenous (natural) radionuclides ^{214}Bi (^{226}Ra series), ^{208}Tl (^{232}Th series) and ^{40}K are indicated by arrows]

Таблица 2

Мощность амбиентного эквивалента дозы от всех источников ($ADER$), от терригенных радионуклидов ($ADER_{TRN}$), от нерассеянных гамма-квантов с энергией 662 кэВ ($ADER_{Cs-prim}$), от суммы рассеянных и нерассеянных гамма-квантов $^{137}Cs+^{137m}Ba$ ($ADER_{Cs-tot}$), фактор дозового накопления ($BUFC_{Cs}$), средняя глубина миграции ^{137}Cs в почве (Z_{Cs}), плотность загрязнения почвы ^{137}Cs , определенная по результатам измерений *in situ* ($A_{Cs-in situ}$) на огородных участках, обследованных в населенных пунктах Брянской области в 2020–2021 гг.

[Table 2

Ambient dose equivalent rate from all sources ($ADER$), from terrestrial radionuclides ($ADER_{TRN}$), from the 662 keV primary photons ($ADER_{Cs-prim}$), from the sum of the primary and scattered photons of $^{137}Cs+^{137m}Ba$ ($ADER_{Cs-tot}$), dose build up factor ($BUFC_{Cs}$), average depth of ^{137}Cs migration in soil (Z_{Cs}), the soil contamination density with ^{137}Cs determined *in situ* ($A_{Cs-in situ}$) in kitchen garden plots that were surveyed in settlements of the Bryansk region in 2020–2021]

Параметр [Parameter]	$ADER$ (нЗв/ч) [(nSv/h)]	$ADER_{TRN}$ (нЗв/ч) [(nSv/h)]	$ADER_{Cs-tot}$ (нЗв/ч) [(nSv/h)]	$ADER_{Cs-prim}$ (нЗв/ч) [(nSv/h)]	$BUFC_{Cs}$	Z_{Cs} (г/см ²) [(g/cm ²)]	$A_{Cs-in situ}$ (кБк/м ²) [(kBq/m ²)]
Минимум [Minimum]	32.4	17	7.9	2.9	2.12	8.8	48
Максимум [Maximum]	461	53	432	159	3.75	17.5	779
Медиана [Median]	143	36	94	34	2.76	14.1	231
Средняя [Mean]	168	35	125	46	2.77	14.3	259
С.о. [SD]	87	9	91	34	0.21	1.9	153
КВ (%) [CV (%)]	52	25	73	75	8	13	59
Число участков [Number of plots]	115	115	115	115	115	92	92

С.о. – стандартное отклонение [SD – standard deviation]; КВ – коэффициент вариации (%) [CV – coefficient of variation (%)].

ненная плотность загрязнения почвы ^{137}Cs была меньше 37 кБк/м^2 . Поэтому для этих 23 участков вычисленные значения Z_{Cs} и $A_{\text{Cs-in-situ}}$ были исключены из общей статистической обработки.

Вычисленные для 92 участков значения Z_{Cs} варьировали от $8,8 \text{ г/см}^2$ до $17,5 \text{ г/см}^2$. Двукратный разброс показателя глубины проникновения ^{137}Cs в почву в определенной мере может быть связан с методом культивации земли: перекопка с помощью лопаты или перепахивание плугом.

Значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-in-situ}}$), определенные с помощью метода BUFCs на 92 огородах, лежали в диапазоне от 48 до 779 кБк/м^2 . Столь широкий разброс значений $A_{\text{Cs-in-situ}}$ в нашей выборке был связан, в первую очередь, с существенными различиями между отдельными НП по показателю плотности чернобыльских выпадений (см. табл. 1). Вместе с тем, в некоторых НП отмечалась внутренняя пространственная неравномерность загрязнения. В частности, в НП Стругова Буда (число обследованных подворий = 6) была обнаружена более чем двукратная разница между максимальным (280 кБк/м^2) и минимальным (132 кБк/м^2) значением $A_{\text{Cs-in-situ}}$. В остальных НП различия между отдельными подворьями по показателю $A_{\text{Cs-in-situ}}$ не превышали 2 раз. Зарегистрированную нами неравномерность загрязнения территории НП следует признать незначительной. Например, по данным М.Ю. Орлова и др. [14], размах значений A_{Cs} в совокупности проб почвы, отобранных в пределах одного НП, мог превышать порядок величины. По данным, представленным Е.К. Ниловой и др. [3], максимальное и минимальное значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах в городском поселке Брагин (Гомельская область, Беларусь) в 2018 г. различались более чем в пять раз.

Среднее значение отношения $A_{\text{Cs-in-situ}}$ к $A_{\text{Cs-off}}$ было равно 1,04 при медиане 1,02. Значения $A_{\text{Cs-in-situ}}$ отклонялись от соответствующих значений $A_{\text{Cs-off}}$ не более чем в 2 раза (табл. 3). На рисунке 3 это соотношение между двумя показателями представлено графически. В целом, полученные

нами результаты натурных измерений и последующих вычислений хорошо соответствуют официальным данным о плотности загрязнения обследованных НП.

Значение $ADER_{\text{Cs-tot}}$, вычисленное для конкретного огорода и нормализованное на плотность загрязнения того же самого огорода ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-in-situ}}$), находилось в диапазоне от 0,41 до 0,84 (нЗв/ч)/(кБк/м²) (см. табл. 3). Средняя величина нормализованной $ADER_{\text{Cs-tot}}$ (по результатам анализа данных для 92 огородных участков) равнялась 0,55 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Практически такое же среднее значение

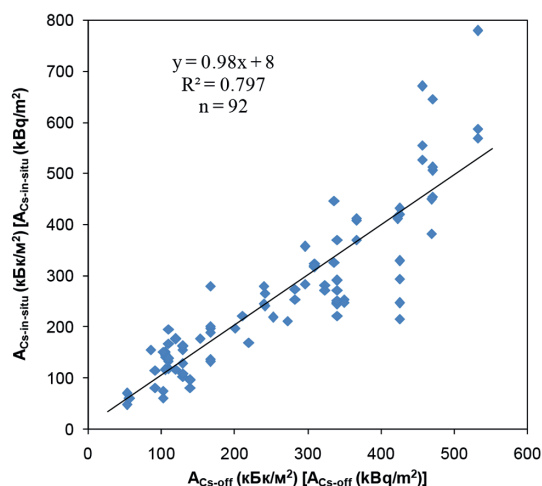


Рис. 3. Соотношение между измеренным *in situ* значением плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородном участке ($A_{\text{Cs-in-situ}}$) и официально установленным средним значением плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в соответствующем населенном пункте ($A_{\text{Cs-off}}$). 39 населенных пунктов Брянской области, 2020–2021 гг.

[Fig. 3. Relationship between the *in situ* measured value of the ^{137}Cs contamination density of soil in a kitchen garden plot ($A_{\text{Cs-in-situ}}$) and the officially established average value of the ^{137}Cs contamination density of soil in the respective settlement ($A_{\text{Cs-off}}$). 39 settlements of the Bryansk region, 2020–2021]

Таблица 3

Соотношения между мощностью амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs ($ADER_{\text{Cs-tot}}$) на огородном участке, значением плотности загрязнения почвы ^{137}Cs , измеренном *in situ* на том же участке ($A_{\text{Cs-in-situ}}$), и официально установленным средним значением плотности загрязнения территории ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-off}}$) того населенного пункта, где расположен огородный участок; Брянская область, 2020–2021 гг.

[Table 3

Relationships between ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs ($ADER_{\text{Cs-tot}}$) in a kitchen garden plot, *in situ* measured value of the ^{137}Cs inventory in soil ($A_{\text{Cs-in-situ}}$) in the same plot, and the officially established average value of the ^{137}Cs contamination density with ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-off}}$) in the settlement where the plot is located; the Bryansk region, 2020–2021]

Параметр [Parameter]	$A_{\text{Cs-in-situ}}/A_{\text{Cs-off}}$	$ADER_{\text{Cs-tot}}/A_{\text{Cs-off}}$ (нЗв/ч)/(кБк/м ²) [(nSv/h)/(kBq/m ²)]	$ADER_{\text{Cs-tot}}/A_{\text{Cs-in-situ}}$ (нЗв/ч)/(кБк/м ²) [(nSv/h)/(kBq/m ²)]
Минимум [Minimum]	0.51	0.19	0.41
Максимум [Maximum]	1.82	1.45	0.84
Медиана [Median]	1.02	0.55	0.55
Средняя [Mean]	1.04	0.57	0.55
С.о. [SD]	0.27	0.19	0.09
КВ (%) [CV (%)]	26	34	16
Число участков [Number of plots]	92	115	92

С.о. – стандартное отклонение [SD – standard deviation]; КВ – коэффициент вариации (%) [CV – coefficient of variation (%)].

ние – 0,57 (нЗв/ч)/(кБк/м²) – было получено при вычислении отношения $ADER_{Cs-tot}$ на огороде к официально установленной средней плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в НП (A_{Cs-off}). Отношение $ADER_{Cs-tot}$ к A_{Cs-off} варьировало в пределах 0,19–1,45 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Т.е. распределение индивидуальных значений при вычислении отношения $ADER_{Cs-tot}$ к A_{Cs-off} было ожидаемо заметно шире, чем таковое для отношения $ADER_{Cs-tot}$ к $A_{Cs-in-situ}$. Эту разницу в широте распределений можно четко видеть на рисунке 4. Различия в широте распределения, что отражается также в различии между значениями коэффициента вариации (см. табл. 3), связаны с жесткой пространственной «привязкой» $ADER_{Cs-tot}$ к уровню загрязнения конкретного участка земли внутри НП ($A_{Cs-in-situ}$).

Представляет интерес сравнить вычисленные нами значения нормализованной $ADER_{Cs-tot}$ с оценкой нормализованной мощности поглощенной дозы в воздухе (МПД), приведенной в работе Ramzaev et al. [4]. По данным этого представительного обследования (число огородных участков = 261), проведенного в юго-западных районах Брянской области в 1996–2001 гг., среднее значение нормализованной МПД от ^{137}Cs в огородной почве было равно $0,41 \pm 0,07$ (нГр/ч)/(кБк/м²). Учитывая, что коэффициент перехода от поглощенной дозы в воздухе к AMBIENTному эквиваленту дозы для ^{137}Cs на огородных участках равен 1,31 Зв/Гр [15], среднее ожидаемое значение нормализованной $ADER_{Cs-tot}$ в работе [4] может быть оценено как $0,54 \pm 0,09$ (нЗв/ч)/(кБк/м²). Эта величина хорошо соответствует нашей оценке данного обобщенного дозиметрического показателя на 2020–2021 гг. (см. табл. 3). Приведенное сравнение указывает

на устойчивость нормализованной мощности дозы гамма-излучения в воздухе на огородах в отдаленном периоде после аварии. По-видимому, через 10–15 лет после радиоактивных выпадений, в результате постоянной культивации уже формируется сравнительно стабильное вертикальное распределение ^{137}Cs в огородной почве. Последующая культивация не приводит к существенным изменениям этого распределения, а соответственно, и величины нормализованной $ADER_{Cs-tot}$. Об отсутствии значительной вертикальной миграции в огородной почве в отдаленном периоде после аварии на ЧАЭС может свидетельствовать весьма длинный экологический период (99 лет) полууменьшения мощности поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs на огородах в Брянской области в 1998–2012 гг. [16].

На основе полученных экспериментальных данных представляется возможным выполнить оценку годовой эффективной дозы внешнего облучения (ED) взрослого человека за время пребывания на огороде. Для вычислений используем следующую формулу [5]:

$$ED_i = ADER_i \times a_i \times b_i \times t \times 10^{-6}, \quad (4)$$

где ED_i – эффективная годовая доза от i -го радионуклида, мЗв/год; $ADER_i$ – мощность AMBIENTного эквивалента дозы от i -го радионуклида, нЗв/ч; a_i – коэффициент перехода от AMBIENTного эквивалента дозы к керме в воздухе для i -го радионуклида, Гр/Зв; b_i – коэффициент перехода от кермы в воздухе к ED для i -го радионуклида, Зв/Гр; t – время нахождения на огородном участке, ч/год; 10^{-6} – коэффициент конверсии нЗв в мЗв.

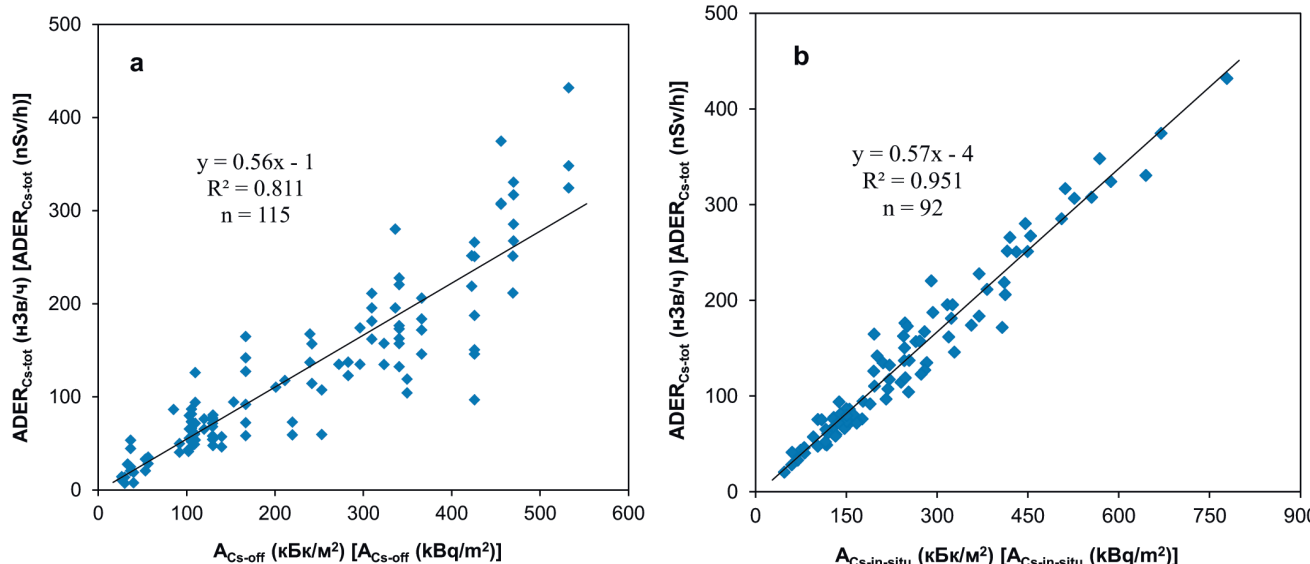


Рис. 4. Соотношение между мощностью AMBIENTного эквивалента дозы от ^{137}Cs на огородном участке ($ADER_{Cs-tot}$) и плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs . Соотношение показано для: (а) официально установленного среднего значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs соответствующего населенного пункта (A_{Cs-off}) и (б) измеренного *in situ* значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на соответствующем огородном участке ($A_{Cs-in-situ}$). 46 населенных пунктов (а) и 39 населенных пунктов (б) Брянской области, 2020–2021 гг.

[Fig. 4.] Relationship between the ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs in a kitchen garden plot ($ADER_{Cs-tot}$) and the density of soil contamination with ^{137}Cs . The ratio is shown for: (a) the officially established average value of the density of soil contamination with ^{137}Cs in the respective settlement (A_{Cs-off}), and (b) the *in situ* measured value of the density of soil contamination with ^{137}Cs at the respective kitchen garden plot ($A_{Cs-in-situ}$). 46 settlements (a) and 39 settlements (b) in the Bryansk region, 2020–2021]

Применительно к культивированной почве значения коэффициентов a_i и b_i равны соответственно: для ^{137}Cs – 0,75 Гр/Зв и 0,71 Зв/Гр; для природных радионуклидов – 0,8 Гр/Зв и 0,7 Зв/Гр [15, 17, 18]. Оценок продолжительности времени, которое проводит взрослый человек, работая на огороде в зоне радиоактивного загрязнения в Брянской области в настоящее время, нам не встретилось. Поэтому для получения значения t мы использовали результаты опроса жителей, проживающих в зоне чернобыльского загрязнения Гомельской области [3]. Эти территории весьма схожи с юго-западными районами Брянской области по климатическим условиям и укладу жизни сельского населения. По данным [3], сельский житель проводит 4 ч в день на приусадебном участке; предполагается, что такой режим работ применим к 7 месяцам в году, что в сумме дает значение t , равное 840 часов в год.

Вычисленные с использованием выражения (4) значения ED, формирующейся за счет нахождения на огородных участках, которые были обследованы нами в 2020–2021 гг. в Брянской области, находились в диапазоне от 0,008 до 0,025 мЗв/год для природных радионуклидов и от 0,004 до 0,20 мЗв/год для ^{137}Cs .

Отметим, что полученные в настоящем исследовании средние значения $ADER_{TRN}$ и нормализованной $ADER_{Cs-tot}$ потенциально можно использовать для вычисления ED, формирующейся при выполнении взрослым человеком работ на огородных участках во всех тех НП, которые относятся в настоящее время к зоне радиоактивного загрязнения в Брянской области. Для вычисления годовой дозы от природных радионуклидов (ED_{TRN} , мЗв/год) используем выражение (4) и величину $ADER_{TRN}$, равную среднему значению $ADER_{TRN}$, которое было определено в нашей работе (35 нЗв/ч). Для вычисления годовой дозы от ^{137}Cs (ED_{Cs} , мЗв/год) применяем формулу, учитывающую официально установленную среднюю плотность загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs-off} , кБк/м²) в НП:

$$ED_{Cs} = ADER_{Cs-norm} \times a_{Cs} \times b_{Cs} \times t \times 10^{-6} \times A_{Cs-off}, \quad (5)$$

где $ADER_{Cs-norm}$ – среднее значение $ADER_{Cs-tot}$ нормализованной на A_{Cs-off} (0,57 (нЗв/ч)/(кБк/м²)); a_{Cs} – коэффициент перехода от AMBIENTНОГО эквивалента дозы к керме в воздухе для ^{137}Cs (0,75 Гр/Зв) [15]; b_{Cs} – коэффициент перехода от кермы в воздухе к мощности эффективной дозы для ^{137}Cs (0,71 Зв/Гр) [18]; t – время пребывания на огородном участке (840 ч/год); 10^{-6} – коэффициент конверсии нЗв в мЗв.

В качестве примера приведем результаты оценки ED для взрослого человека за время его пребывания на огородном участке в селе Заборье. Этот НП характеризуется максимальной средней плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs на территории Брянской области: 55,5 Ки/км² в 2017 г. [7] или 1890 кБк/м² в 2020 г. Значения ED_{TRN} и ED_{Cs} в Заборье в 2020 г. могли составить 0,016 мЗв и 0,48 мЗв соответственно.

Заключение

Анализ результатов выполненного исследования позволяет сделать вывод о том, что метод полевой (*in situ*) гамма-спектрометрии может быть использован для проведения массовых мониторинговых измерений плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородных участках НП, расположенных в Брянской области в зоне радиоактивного загрязнения после аварии на ЧАЭС. Полученные нами результаты натурных измерений и последующих вычислений плотности загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{Cs-in-situ}$) хорошо соответствуют официальным данным о средней плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs-off}) в обследованных НП. Среднее значение отношения $A_{Cs-in-situ}/A_{Cs-off}$ было равно 1,04 при медиане 1,02. Индивидуальные значения $A_{Cs-in-situ}$ отклонялись от соответствующих значений A_{Cs-off} не более чем в два раза. Применение метода полевой гамма-спектрометрии позволяет оперативно раздельно определить значения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы от ^{137}Cs и природных радионуклидов, а также оценить эффективную дозу внешнего облучения взрослого человека в случае его пребывания на огородном участке. Для предварительной оценки мощности эффективной дозы от природных радионуклидов в НП загрязненных районов Брянской области может быть рекомендована фиксированная величина мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы, равная 35 нЗв/ч. Для оценки мощности эффективной дозы от ^{137}Cs может быть рекомендовано текущее значение A_{Cs-off} , выраженное в терминах кБк/м², и фиксированное значение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы $ADER_{Cs-tot}$, нормализованной на A_{Cs-off} – 0,57 (нЗв/ч)/(кБк/м²).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовки данной статьи.

Благодарность

Авторы благодарят А. Братилову за помощь при проведении полевых исследований. Финансирование работы осуществлялось по контракту № 0173100001419000019 с Роспотребнадзором.

Персональное участие авторов

В.П. Рамзаев выполнил часть полевых исследований, написал черновик статьи и оформил рукопись для представления в редакцию журнала. А.Н. Барковский сформулировал цель и задачи исследования, провел анализ экспериментальных данных и отредактировал окончательный вариант статьи. А.А. Братилова организовала проведение полевых исследований, выполнила часть измерений и отредактировала промежуточный вариант статьи.

Литература

1. Травникова И.Г., Брук Г.Я., Шутов В.Н., и др. Пути формирования доз внутреннего облучения сельских жителей Брянской области после аварии на ЧАЭС (Часть первая) // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 2. С. 11–20.
2. Травникова И.Г. Динамика изменений рационов питания населения Брянской области, живущего на территориях,

- загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 28–32.
3. Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., и др. 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.
4. Ramzaev V., Yonehara H., Hille R., et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003 // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 85. P. 205–227.
5. Ramzaev V., Bernhardsson C., Dvornik A., et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018 // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. Vol. 214–215. P. 106168.
6. Golikov V., Balonov M.I., Jacob P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident // Radiation and Environmental Biophysics. 2002. Vol. 41. P. 185–193.
7. Брук Г.Я., Романович И.К., Базюкин А.Б., и др. Средние годовые эффективные дозы облучения в 2017 году жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС (для целей зонирования населенных пунктов) // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 4. С. 73–78.
8. ATOMTEX. Спектрометр MKC-AT6101D. URL: <https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/mks-at6101d.pdf> (Дата обращения: 12.09.2020).
9. Ramzaev V., Barkovsky A., Bernhardsson C., Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2017. Vol. 10, No. 1. P. 18–29.
10. Ramzaev V., Bernhardsson C., Barkovsky A., et al. A backpack γ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate, $H^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation // Radiation Measurements. 2017. Vol. 107. P. 14–22.
11. Ramzaev V., Bernhardsson C., Dvornik A., et al. *In situ* determination of ^{137}Cs inventory in soil using a field-portable scintillation gamma spectrometer-dosimeter. Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 231. P. 106562.
12. Кризюк Э.М. Ядерно-физические характеристики естественных радионуклидов // Атомная энергия. 1986. Т. 61, № 1. С. 59–60.
13. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Валидация метода определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах с использованием портативного спектрометра-дозиметра MKC AT6101D *in situ* // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 56–65.
14. Орлов М.Ю., Сныков В.П., Бочков Л.П. Определение средней плотности загрязнения почвы ^{137}Cs // Атомная энергия. 1994. Т. 76, № 3. С. 212–217.
15. Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2015. Vol. 8, No. 3. P. 6–20.
16. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Динамика уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в сельских населенных пунктах Брянской области России в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 38–46.
17. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. 2000. United Nations, New York.
18. Golikov V., Wallström E., Wöhni T., et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms // Radiation and Environmental Biophysics. 2007. Vol. 46. P. 375–382.

Поступила: 15.04.2021 г.

Рамзаев Валерий Павлович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

Барковский Анатолий Николаевич – руководитель Федерального радиологического центра, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Братилова Анжелика Анатольевна – научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Мощность амбиентного эквивалента дозы и плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах в населенных пунктах Брянской области России в 2020–2021 гг. // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 85–95. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-85-95

Ambient dose equivalent rate and soil contamination density with ^{137}Cs in kitchen gardens in settlements of the Bryansk region, Russia in 2020–2021

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky, Anzhelika A. Bratilova

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

The article provides results of application of the field (in situ) gamma spectrometry method for carrying out mass monitoring measurements of ambient dose equivalent rate and soil contamination density with ^{137}Cs in kitchen garden plots located in the zone of radioactive contamination after the Chernobyl accident. In 2020 and 2021, 115 private farmsteads in 46 settlements of the Bryansk region were surveyed. At the time of the survey, the officially established average density of soil contamination with ^{137}Cs in the settlements ranged from 27 to 533 kBq/m^2 . The field spectra were measured using a portable scintillation gamma-spectrometer-dosimeter. Results of the field measurements and subsequent calculations of soil contamination density with ^{137}Cs in the kitchen gardens were in good agreement with official data on the average soil contamination density with ^{137}Cs in the surveyed settlements. The mean value of the ratio of the experimental data to the official data was 1.04. Individual values of experimental data deviated from corresponding official values by no more than two times. The use of the gamma spectrometry method in situ made it possible: 1) to determine separately values of the ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs and from natural radionuclides in the soil, and 2) to estimate the effective external doses to a person who worked in the kitchen gardens. The measured values of ambient dose equivalent rate varied from 17 to 53 nSv/h (mean $\pm$ standard deviation = $35 \pm 9 \text{ nSv/h}$) for natural radionuclides and from 8 to 432 nSv/h (mean $\pm$ standard deviation = $125 \pm 91 \text{ nSv/h}$) for ^{137}Cs . The ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs normalized to the soil contamination density with ^{137}Cs in the same kitchen garden was in the range of 0.41–0.84 ($\text{nSv/h}/(\text{kBq/m}^2)$) with a mean value of 0.55 ($\text{nSv/h}/(\text{kBq/m}^2)$). If a person stayed in kitchen garden for 840 hours per year, the estimated effective external doses from natural radionuclides and ^{137}Cs were respectively in the range of 0.008–0.025 mSv/year and 0.004–0.20 mSv/year .

Key words: the Chernobyl accident, soil, kitchen garden, ^{137}Cs , contamination density, ambient dose equivalent rate, in situ, gamma spectrometry.

References

1. Travnikova IG, Bruk GY, Shutov VN, Bazyukin AB. Contribution of different foodstuffs to the internal exposure of the rural inhabitants of the Bryansk region in Russia after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(2): 11–20. (In Russian).
2. Travnikova IG. The dynamics of food rations of Bryansk region population living in the territories contaminated after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(3): 26–32. (In Russian).
3. Nilova EK, Bortnovsky VN, Tagai SA, Dudareva NV, Nikitin AN. 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). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 25–37. (In Russian).
4. Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, Barkovsky A, Mishine A, Sahoo SK, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 205–227.
5. Ramzaev V, Bernhardsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M, et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;214: 106168.
6. Golikov V, Balonov MI, Jacob P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2002;41: 185–193.
7. Bruk GY, Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Vlasov AY, Gromov AV, et al. The average annual effective doses for the population in the settlements of the Russian Federation attributed to zones of radioactive contamination due to the Chernobyl accident (for zonation purposes), 2017. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(4): 73–78. (In Russian).
8. ATOMTEX, 2020. AT6101D spectrometer. Available on: <https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/mks-at6101d.pdf>. (Accessed 12 September 2020). (In Russian).
9. Ramzaev V, Barkovsky A, Bernhardsson C, Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 18–29.
10. Ramzaev V, Bernhardsson C, Barkovsky A, Romanovich I, Jarneborn J, Mattsson S, et al. A backpack γ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate, $\text{H}^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation. *Radiation Measurements*. 2017;107: 14–22.
11. Ramzaev V, Bernhardsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M. *In situ* determination of ^{137}Cs inventory in soil using a field-portable scintillation gamma spectrometer-dosimeter. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;231: 106562.
12. Krisyuk EM. Nuclear and physical characteristics of naturally occurring radionuclides. *Atomnaya Energija = Atomic Energy*. 1986;61(1): 59–60. (In Russian).

Valery P. Ramzaev

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

13. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Validation of a method for *in situ* determination of ^{137}Cs soil contamination density in kitchen gardens using the portable spectrometer-dosimeter MKS AT6101D. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 56–65. (In Russian).
14. Orlov MY, Snykov VP, Bochkov LP. Determination of average ground ^{137}Cs contamination. *Atomnaya Energia = Atomic Energy*. 1994;76(3): 212–217. (In Russian).
15. Ramzaev VP, Barkovsky AN. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 6–20.
16. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Dynamics of decrease of the gamma dose rate in air in rural settlements of the Bryansk region (Russia) in the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 38–46. (In Russian).
17. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. 2000. United Nations, New York.
18. Golikov V, Wallström E, Wöhni T, Tanaka K, Endo S, Hoshi M. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2007;46: 375–382.

Received: April 15, 2021

For correspondence: Valery P. Ramzaev – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru)

Anatoly N. Barkovsky – Head of the Federal Radiological Centre, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Anzhelika A. Bratilova – Research Fellow of Internal Radiation Laboratory of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N., Bratilova A.A. 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. Vol. 14, No. 4. P. 85–95. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-85-95