

Валидация метода определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах с использованием портативного спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д *in situ*

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

*Отбор представительных проб почвы на обследуемом участке территории и последующее определение содержания радионуклидов в этих пробах в условиях лаборатории (так называемый метод *ex situ*) является общепризнанной технологией определения плотности загрязнения ^{137}Cs территории населенных пунктов. В последнее время в качестве дополнения или альтернативы методу *ex situ* все чаще применяют методы полевой (*in situ*) гамма-спектрометрии. В этом случае можно определить плотность загрязнения почвы ^{137}Cs непосредственно на месте, без отбора проб и их анализа в лаборатории. Вместе с тем, методология *in situ* имеет ряд ограничений, из которых наиболее принципиальным является отсутствие общепризнанного метрологического обеспечения проведения измерений и интерпретации результатов. Поэтому перед применением конкретной методики и измерительного устройства для проведения широкомасштабных измерений *in situ* необходимо проводить валидацию (оценку пригодности) выбранного метода в планируемых условиях проведения измерений с помощью устоявшегося метода *ex situ*. Целью данного исследования являлась валидация метода определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах с использованием спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д *in situ*. Этот метод был недавно представлен российско-шведско-белорусской группой исследователей в статье, опубликованной в *Journal of Environmental Radioactivity* (<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106562>). Для тестирования метода нами были использованы 10 представительных огородных участков, расположенных в 6 населенных пунктах Брянской области. Территория населенных пунктов была сильно загрязнена ^{137}Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС: официально установленная плотность цезиевого загрязнения в 2017 г. находилась в диапазоне 111–511 кБк/м². Для набора полевого спектра прибор МКС АТ6101Д размещали в центре выбранного участка на алюминиевой треноге. Продолжительность измерения варьировала от 1207 до 1801 с (среднее значение 1383 с). Пробы огородной почвы были отобраны послойно (с шагом ~5 см) до глубины 20 см с использованием цилиндрического гамма-спектрометра было определено содержание ^{137}Cs в каждом слое почвы, объединенном для всех отобранных на участке проб, и вычислено значение плотности загрязнения почвы ^{137}Cs для суммы всех отобранных слоев. Эти значения плотности загрязнения, полученные *ex situ*, находились в диапазоне от 77 до 548 кБк/м². Установлено, что результаты лабораторных анализов проб почвы хорошо согласуются со значениями плотности загрязнения, полученными с помощью тестируемого метода *in situ*. В среднем различия между двумя методологиями составили 7% (20% в максимуме). Результаты исследования подтверждают, что метод, предложенный международной группой, пригоден для определения плотности загрязнения огородной почвы ^{137}Cs на отдаленном этапе после Чернобыльской аварии.*

Ключевые слова: ^{137}Cs , почва, плотность загрязнения, огород, метод *in situ*, валидация.

Введение

Одной из основных целей радиационно-гигиенического мониторинга на территориях Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению после Чернобыльской аварии, является оценка доз внешнего и внутреннего облучения человека. В значительной степени расчеты доз базируются на данных о плотности

загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs} , размерность: кБк/м² или Ки/км²), устанавливаемой Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) для каждого населенного пункта (НП) на текущий год [1–3]. При этом речь идет о среднем значении A_{Cs} для всей территории НП. Однако при выполнении радиационно-гигиенического обследования конкрет-

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

ного НП мониторинг радиационной обстановки (в частности, измерения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы (МАЭД, Зв/ч) проводится, как правило, выборочно на ограниченном числе частных подворий. Плотность загрязнения почвы на конкретном подворье в каком-либо НП может совпадать со средним значением A_{Cs} для данного НП, но может и значительно отличаться от такового. В частности, по обобщенным данным обследований НП Брянской области России в первые послеаварийные годы [4] в некоторых НП наблюдались более чем десятикратные различия между минимальным и максимальным значениями A_{Cs} . Обследования огородов (по 8–10 подворий в каждом из 10 НП), выполненные в 1995–1997 гг. в Брянской области, также показали существенную неоднородность цезиевого загрязнения внутри отдельно взятого НП: в среднем коэффициент вариации значений A_{Cs} равнялся 26% (36% в максимуме) [5]. По результатам измерений Е.К. Ниловой и др. [6], проводивших обследования в городском поселке Брагин (Гомельская область, Беларусь) в 2018 г., можно видеть более чем пятикратную разницу между максимумом и минимумом плотности загрязнения ^{137}Cs почвы на различных огородах ($n = 12$).

В условиях столь выраженной неравномерности распределения загрязнения по территории НП имеет смысл проводить измерения МАЭД параллельно с определением A_{Cs} непосредственно на обследуемом подворье. Это позволяет получить более устойчивые и экспериментально обоснованные значения техногенной МАЭД, нормализованной на плотность загрязнения почвы ^{137}Cs (Зв/ч)/(кБк/м²). Ранее этот комплексный подход был использован при вычислении не только нормализованной мощности дозы гамма-излучения в воздухе в типичных локациях внутри НП, но и нормализованной дозы внешнего облучения различных групп населения, проживающего в сельской местности [7].

Наиболее сложным и трудоемким элементом данной комплексной методологии является отбор представительных проб почвы на обследуемом участке и последующее количественное определение содержания техногенных и природных радионуклидов в этих пробах в условиях лаборатории (так называемый метод *ex situ* [8, 9]). Однако в последнее время в качестве альтернативы методу *ex situ* все чаще применяют методы полевой (*in situ*) гамма-спектрометрии [10], которые позволяют измерить A_{Cs} непосредственно на месте, без отбора почвенных проб и их последующего анализа в лаборатории [11–15]. Одним из достоинств методологии определения A_{Cs} *in situ* является возможность проведения сравнительно большого количества измерений за ограниченное время. В свою очередь, это делает возможным получение подробного представления о пространственном распределении радионуклида по выбранному участку территории [15]. Вместе с тем, методология *in situ* имеет ряд ограничений, из которых наиболее принципиальным является отсутствие общепризнанного метрологического обеспечения проведения измерений и интерпретации результатов. В связи с этим перед применением конкретной методики и измерительного устройства для проведения широкомасштабных измерений *in situ* необходимо проводить валидацию (оценку пригодности) выбранного метода в

планируемых условиях проведения обследований с помощью устоявшегося метода *ex situ* [16].

Одним из современных измерительных приборов, которые потенциально могут быть использованы для определения A_{Cs} *in situ*, является спектрометр-дозиметр МКС АТ6101Д (производитель АТОМТЕХ, Беларусь) [17]. В 2015–2019 гг. этот прибор активно применялся ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева (в кооперации с лабораториями из Лундского университета Швеции и Института радиобиологии Академии наук Беларуси) для измерений МАЭД и определения содержания природных радионуклидов в почве на радиоактивно загрязненных и контрольных (условно «чистых») территориях России и Беларуси [18–22]. Недавно международная группа исследователей [16] разработала и верифицировала эмпирический метод для определения A_{Cs} в почве *in situ* на открытых земляных участках (луга и культивируемые земли) и в лесах с использованием МКС АТ6101Д. Разработанный метод (ниже по тексту «метод BUFCS») основан на оценке фактора накопления [англ., build-up factor (BUF)] AMBIENTНОГО эквивалента дозы от ^{137}Cs .

Летом 2020 г. МКС АТ6101Д был применен нами при проведении мониторинговых обследований (измерения МАЭД) НП Брянской области в рамках 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/>]. На этапе планирования этих радиационно-гигиенических обследований было принято решение об использовании МКС АТ6101Д не только для измерений МАЭД, но и для определения A_{Cs} на огородах. Такие участки культивируемой земли в настоящее время можно обнаружить внутри любого жилого сельского НП, а также в городах Брянской области. В этом отношении огород может являться вполне подходящей референтной локацией для определения A_{Cs} в НП на отдаленном этапе радиационной аварии.

Цель исследования – определение пригодности метода BUFCS для определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах с использованием спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д *in situ*.

Материалы и методы

Для валидации метода BUFCS мы выбрали 10 огородных участков, расположенных в НП, различающихся по официально установленному среднему значению плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs-off}): Колюды (3,0 Ки/км²), Кургановка (3,2 Ки/км²), Красная Гора (4,1 Ки/км²), Карпиловка (8,0 Ки/км²), Денисковичи (9,5 Ки/км²), Злынка (13,8 Ки/км²). Значения плотности даны Росгидрометом на 01.01.2017 г. [2].

Обследования на огородных участках были проведены в период 3–7 августа 2020 г. К этому времени значения плотности загрязнения, приведенные выше, уменьшились за счет радиоактивного распада ^{137}Cs на 8%. Пересчитанные на 5 августа 2020 г. и переведенные в современные единицы измерения (кБк/м²) средние значения A_{Cs-off} приведены в таблице 1.

Таблица 1

Официально установленные значения средней плотности загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-off}}$) в 6 обследованных населенных пунктах, и значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs , определенные по результатам измерений *ex situ* ($A_{\text{Cs-ex-situ}}$) и *in situ* ($A_{\text{Cs-in-situ}}$) на 10 огородных участках

[Table 1

Officially given average values of soil contamination density with ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-off}}$) in the six surveyed settlements, and the values of the soil contamination density by ^{137}Cs determined with the *ex situ* ($A_{\text{Cs-ex-situ}}$) and *in situ* ($A_{\text{Cs-in-situ}}$) methods at the 10 kitchen garden plots]

Населенный пункт [Settlement]	Код участка [Plot code]	Значение плотности загрязнения почвы (кБк/м ²) [Values of soil contamination density (kBq/m ²)]			Отношение значений плотностей [Ratio of the density values]		
		$A_{\text{Cs-off}}$	$A_{\text{Cs-ex-situ}}$	$A_{\text{Cs-in-situ}}$	$\frac{A_{\text{Cs-ex-situ}}}{A_{\text{Cs-off}}}$	$\frac{A_{\text{Cs-in-situ}}}{A_{\text{Cs-off}}}$	$\frac{A_{\text{Cs-in-situ}}}{A_{\text{Cs-ex-situ}}}$
Колюды [Koludy]	Cen-18	102	76.6	74.4	0,75	0,73	0,97
Кургановка [Kurganovka]	Cen-59	109	99.3	119	0,91	1,09	1,20
Красная Гора [Krasnaya Gora]	Par-14	140	69.3	80.5	0,50	0,58	1,16
Карпиловка [Karpilovka]	Nov	272	226	214	0,83	0,79	0,95
Денисовичи [Deniscovich]	Per-9	324	258	282	0,80	0,87	1,09
Денисовичи [Deniscovich]	Per-11	324	260	271	0,80	0,84	1,04
Злынка [Zlynka]	Kir-96	470	490	506	1,04	1,08	1,03
Злынка [Zlynka]	Oct-66	470	546	645	1,16	1,37	1,18
Злынка [Zlynka]	Kom-120	470	407	454	0,87	0,97	1,12
Злынка [Zlynka]	Vok-1	470	548	512	1,17	1,09	0,93
Медиана [Median]					0,85	0,92	1,07
Средняя [Mean]					0,88	0,94	1,07
Стандартное отклонение [Standard deviation]					0,20	0,23	0,10

Перед выполнением измерений мы выбирали ровную горизонтальную площадку размером приблизительно 10 м × 10 м. К моменту наших обследований хозяева уже приступили к уборке урожая, поэтому на огородах, наряду с оголенной почвой, имелись места, покрытые живыми растениями и остатками убранных растений (рис. 1). При выборе площадки учитывалась однородность гамма-поля в воздухе. Для изучения этого показателя в 5–6 точках (в углах и в центре площадки) на высоте 50–60 см были проведены экспресс-измерения МАЭД с использованием МКС АТ6101Д. Площадка считалась пригодной для дальнейшего обследования в том случае, если разница между максимальным и минимальным значениями МАЭД не превышала 15%. Эта величина укладывалась в пределы вариабельности показателя МАЭД на площадках, использованных для разработки метода ВUFCs [20, 21].

Для регистрации полевого спектра прибор МКС АТ6101Д размещали в центре выбранной площадки на алюминиевой треноге. Блок детектирования вывешивали вертикально кристаллом NaI(Tl) вниз (см. рис. 1). Расстояние между эффективным центром кристалла и поверхность почвы было равно 1 м. Продолжительность набора спектра находилась в диапазоне 1207–1801 с (среднее значение = 1383 с). Набранный спектр записывали в память прибора. Обработку спектров и последующие вычисления значений плотности загрязнения почвы ^{137}Cs *in situ* ($A_{\text{Cs-in-situ}}$, кБк/м²) проводили на портативном компьютере с установленной программой ATAS Lite (АТОМТЕХ) по следующему алгоритму [16]:



Рис. 1. Расположение спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д на треноге во время проведения полевых измерений на огородных участках; населенный пункт Злынка, 3 августа 2020 г.
[Fig. 1. Placement of the MKS AT6101D spectrometer-dosimeter on a tripod during field measurements in kitchen gardens; the settlement Zlynka, 3 August 2020]

1. Используя возможности программы ATAS Lite, определяли значения 3 следующих основных показателей: общая мощность AMBIENTного эквивалента дозы (ADER, нЗв/ч), эффективная удельная активность природных (терригенных) радионуклидов (AC_{eff} , Бк/кг), ско-

рость счета импульсов в пике полного поглощения гамма-квантов с энергией 662 кэВ (PAR_{662} , импульс/с).

2. Значение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы от природных радионуклидов ($ADER_{TRN}$, нЗв/ч) вычисляли по формуле:

$$ADER_{TRN} = CC_{eff} \times AC_{eff}, \quad (1)$$

где CC_{eff} – коэффициент конверсии (нЗв/ч)/(Бк/кг); численно этот коэффициент равен 0,51 для нашего спектрометра-дозиметра АТ6101Д [18].

3. Полную мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы от ^{137}Cs ($ADER_{Cs-tot}$, нЗв/ч) вычисляли по формуле:

$$ADER_{Cs-tot} = ADER - ADER_{TRN} - DR_0, \quad (2)$$

где $ADER$ (нЗв/ч) – общая мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы (показания прибора) на участке; $ADER_{TRN}$ (нЗв/ч) – мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы от природных (терригенных) радионуклидов на участке; DR_0 – собственный фон прибора и вклад от космического излучения. Значение этой компоненты принято равным 8 нЗв/ч [19].

4. Для вычисления значения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы от первичных (нерассеянных) фотонов с энергией 662 кэВ от ^{137}Cs – ^{137m}Ba , ($ADER_{Cs-prim}$, нЗв/ч) использовали формулу:

$$ADER_{Cs-prim} = PAR_{662} \times CC_{prim}, \quad (3)$$

где CC_{prim} – коэффициент преобразования скорости счета в пике полного поглощения (PAR_{662} , импульс/с) в мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы. Значение этого коэффициента для нашего прибора равно 1,25 (нЗв/ч)/(импульс/с) [19].

5. Фактор накопления AMBIENTНОГО эквивалента дозы (BUF_{Cs} , безразмерная величина) вычисляли по формуле:

$$BUF_{Cs} = \frac{ADER_{Cs-tot}}{ADER_{Cs-prim}}, \quad (4)$$

6. Для вычисления коэффициента преобразования $ADER_{Cs-prim}$ в $A_{Cs-in-situ}$ применяли формулу, выведенную в работе [16]:

$$CC_{BUF} = a \times \exp(b \times BUF_{Cs}), \quad (5)$$

где CC_{BUF} [(кБк/м²)/(нЗв/ч)] – коэффициент преобразования $ADER_{Cs-prim}$ (нЗв/ч) в $A_{Cs-in-situ}$ (кБк/м²); a – эмпирический коэффициент, равный 0,099 [(кБк/м²)/(нЗв/ч)]; b – эмпирический коэффициент, равный 1,437 (безразмерная величина); BUF_{Cs} – безразмерная переменная.

7. Для вычисления $A_{Cs-in-situ}$ использовали выражение:

$$A_{Cs-in-situ} = ADER_{Cs-prim} \times CC_{BUF}, \quad (6)$$

Одновременно с проведением гамма-спектрометрического исследования на огородных участках был выполнен отбор проб почвы. Взятие проб было осуществлено с помощью разборного цилиндрического пробоотборника с площадью поперечного сечения 20 см². На каждом участке было отобрано по 5 ядер до глубины 20 см: 4 прокола по углам выбранной площадки и 1 прокол в центре. Ядра почвы делили на горизонтальные слои толщиной ~5 см. Материал от каждого слоя (всего 4 слоя) всех ядер помещали в полиэтилен-

новые пакеты и взвешивали для определения влажного веса образцов.

Измерение активности ^{137}Cs в пробах проводили в лабораторных условиях (*ex situ*) с помощью электроохлаждаемого полупроводникового гамма-спектрометра с детектором из особо чистого германия TSP-DX-100T-PAС-PKG-1 фирмы ORTEC (США). Во время проведения измерений спектрометр со счетным образцом размещали внутри защитной камеры, имеющей стальные стенки толщиной 20 см. Общая неопределенность измерения активности ^{137}Cs не превышала 12% (95% вероятность). По результатам измерений активности радионуклида в образцах, а также на основании измеренного веса каждого образца и площади поперечного сечения ядра были вычислены основные радиометрические показатели: 1) удельная активность ^{137}Cs в каждом из слоев почвы (УА, Бк/кг на влажный вес); 2) плотность загрязнения ^{137}Cs для каждого слоя и для суммы всех 4 слоев почвы ($A_{Cs-ex-situ}$, кБк/м²).

Результаты и обсуждение

Значения $ADER$ находились в диапазоне от 93 до 357 нЗв/ч (табл. 2). От 47 до 92% этой величины (в среднем 75%) приходилось на компоненту, обусловленную ^{137}Cs ($ADER_{Cs-tot}$). Основной вклад в техногенную компоненту вносило рассеянное излучение; доля дозы от первичных гамма-квантов с энергией 662 кэВ от ^{137}Cs – ^{137m}Ba ($ADER_{Cs-prim}$) в $ADER_{Cs-tot}$ мало варьировала от 35 до 38% (в среднем 37%). Эти значения соответствуют критерию отнесения открытых земляных участков к категории культивируемых почв [23].

Вычисленные значения BUF_{Cs} находились в сравнительно узком диапазоне 2,58–2,86 (средняя = 2,70).

Удельная активность ^{137}Cs в пробах почвы демонстрировала достаточно широкий размах значений: от 200 до 1930 Бк/кг (табл. 3). Этот разброс связан, прежде всего, с тем обстоятельством, что отбор проб был преднамеренно осуществлен на площадках, расположенных в НП с разными средними значениями плотности загрязнения почвы ^{137}Cs . Однако, наряду с выраженными различиями между отдельными площадками по абсолютным значениям УА, на некоторых участках отмечалось еще и неравномерное распределение ^{137}Cs по вертикали (см. табл. 3). В среднем по всем 10 огородам УА в нижнем слое (глубина 15–20 см) была на 15% меньше, чем таковая в самом верхнем слое (0–5 см). Полученные нами распределения УА по вертикали в слое почвы толщиной 20 см в целом соответствовали типичному распределению УА ^{137}Cs в почве 22 огородов, обследованных в 1996–2001 гг. в радиоактивно загрязненных районах Брянской области [7].

По данным лабораторных исследований, плотность загрязнения огородной почвы ^{137}Cs ($A_{Cs-ex-situ}$) находилась в диапазоне от 77 до 548 кБк/м². Как видно из таблицы 1, эти значения удовлетворительно сходятся с официальными данными о плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs-off}) в обследованных НП. В среднем $A_{Cs-ex-situ}$ была на 12% меньше, чем A_{Cs-off} . Отметим, однако, что эту величину различий (как, впрочем, и направленность различий) следует рассматривать в качестве первого приближения, т.к. количество проб, отобранных в каждом из НП (от 1 до 4), да и само количество НП (6), было явно недостаточно для более определенных и статистически обоснованных выкладок.

Таблица 2

Мощность AMBIENTНОГО 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 от $^{137}Cs+^{137m}Ba$ ($ADER_{Cs-tot}$), вклад (%) $ADER_{Cs-prim}$ в $ADER_{Cs-tot}$ и фактор дозового накопления (BUF_{Cs}) на огородных участках, обследованных в Брянской области в 2020 г.

[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 $^{137}Cs+^{137m}Ba$ ($ADER_{Cs-tot}$), input (%) of $ADER_{Cs-prim}$ to $ADER_{Cs-tot}$ and dose build up factor (BUF_{Cs}) at the kitchen garden plots surveyed in the Bryansk region in 2020]

Населенный пункт [Settlement]	Код участка [Plot code]	ADER (нЗв/ч) [(nSv/h)]	$ADER_{TRN}$ (нЗв/ч) [(nSv/h)]	$ADER_{Cs-prim}$ (нЗв/ч) [(nSv/h)]	$ADER_{Cs-tot}$ (нЗв/ч) [(nSv/h)]	Вклад $ADER_{Cs-prim}$ в $ADER_{Cs-tot}$ (%) [Input of $ADER_{Cs-prim}$ to $ADER_{Cs-tot}$ (%)]	BUF_{Cs}
Колюды [Koludy]	Cen-18	93,4	41,8	16,4	43,6	38	2,66
Кургановка [Kurganovka]	Cen-59	108	39,2	21,6	60,6	36	2,80
Красная Гора [Krasnaya Gora]	Par-14	93,3	39,0	17,3	46,3	37	2,68
Карпиловка [Karpilovka]	Nov	172	29,3	52,2	135	39	2,58
Денисковичи [Deniscovich]	Per-9	181	38,6	47,0	134	35	2,86
Денисковичи [Deniscovich]	Per-11	203	37,8	58,8	157	37	2,68
Злынка [Zlynka]	Kir-96	318	24,7	106	285	37	2,70
Злынка [Zlynka]	Oct-66	357	18,6	118	330	36	2,79
Злынка [Zlynka]	Kom-120	293	17,9	100	267	38	2,66
Злынка [Zlynka]	Vok-1	345	20,2	121	317	38	2,61

Статистическая неопределенность (при 95% вероятности) измерения ADER была менее 2%; для $ADER_{TRN}$ эта неопределенность находилась в диапазоне 5–8% (средняя = 6%), для $ADER_{Cs-prim}$ – в диапазоне 2–6% (средняя = 3%), для $ADER_{Cs-tot}$ – в диапазоне 2–9% (средняя = 4%).

[The statistical uncertainty (at 95% probability) of ADER measurement was less than 2%; for $ADER_{TRN}$, this uncertainty was in the range of 5–8% (mean = 6%); for $ADER_{Cs-prim}$, it was in the range of 2–6% (mean = 3%); for $ADER_{Cs-tot}$, it was in the range of 2–9% (mean = 4%).]

Таблица 3

Удельная активность ^{137}Cs (Бк/кг на сырой вес) и относительная удельная активность ^{137}Cs (удельная активность в слое 0–5 см взята за единицу) в пробах огородной почвы, отобранной в Брянской области в 2020 г.

[Table 3]

Activity concentration of ^{137}Cs (Bq/kg, wet weight) and the relative activity concentration of ^{137}Cs (the activity concentration in the 0–5 cm layer is taken as unity) in the kitchen garden soil samples collected in the Bryansk region in 2020]

Населенный пункт [Settlement]	Код участка [Plot code]	Удельная активность (Бк/кг)* [Activity concentration (Bq/kg)*]				Относительная удельная активность [Relative activity concentration]			
		0–5 см [0–5 cm]	5–10 см [5–10 cm]	10–15 см [10–15 cm]	15–20 см [15–20 cm]	0–5 см [0–5 cm]	5–10 см [5–10 cm]	10–15 см [10–15 cm]	15–20 см [15–20 cm]
Колюды [Koludy]	Cen-18	271	266	267	199	1,00	0,98	0,99	0,74
Кургановка [Kurganovka]	Cen-59	334	346	321	322	1,00	1,04	0,96	0,96
Красная Гора [Krasnaya Gora]	Par-14	283	267	282	185	1,00	0,94	1,00	0,65
Карпиловка [Karpilovka]	Nov	828	759	748	636	1,00	0,92	0,90	0,77
Денисковичи [Deniscovich]	Per-9	799	762	713	757	1,00	0,95	0,89	0,95
Денисковичи [Deniscovich]	Per-11	911	878	839	886	1,00	0,96	0,92	0,97
Злынка [Zlynka]	Kir-96	1680	1630	1660	1490	1,00	0,97	0,99	0,89

Населенный пункт [Settlement]	Код участка [Plot code]	Удельная активность (Бк/кг)* [Activity concentration (Bq/kg)*]				Относительная удельная активность [Relative activity concentration]			
		0–5 см [0–5 cm]	5–10 см [5–10 cm]	10–15 см [10–15 cm]	15–20 см [15–20 cm]	0–5 см [0–5 cm]	5–10 см [5–10 cm]	10–15 см [10–15 cm]	15–20 см [15–20 cm]
Злынка [Zlynka]	Oct-66	1910	1920	1930	1820	1,00	1,01	1,01	0,95
Злынка [Zlynka]	Kom-120	1550	1450	1440	920	1,00	0,94	0,93	0,59
Злынка [Zlynka]	Vok-1	1800	1790	1870	1800	1,00	1,00	1,04	1,00
Медиана [Median]						1,00	0,97	0,97	0,92
Средняя [Mean]						1,00	0,97	0,96	0,85
Стандартное отклонение [Standard deviation]						0,00	0,04	0,05	0,15

* – статистическая неопределенность (при 95% вероятности) измерения удельной активности ¹³⁷Cs не превышала 3%.
 [* – the statistical uncertainty (at 95% probability) of ¹³⁷Cs activity concentration measurements did not exceed 3%.]

По данным полевых измерений, значения $A_{Cs-in-situ}$ полученные с использованием метода BUFCs, находились в диапазоне от 74 до 645 кБк/м² (см. табл. 1). Среднее отношение $A_{Cs-in-situ}/A_{Cs-off}$ было равно 0,94 (диапазон 0,58–1,37). Разброс значений отношения $A_{Cs-in-situ}/A_{Cs-ex-situ}$ был существенно уже: 0,93–1,20, при средней величине 1,07. Некоторое превышение среднего значения отношения $A_{Cs-in-situ}/A_{Cs-ex-situ}$ над единицей можно было ожидать, т.к. для разработки и верификации метода BUFCs использовали керны почвы, отобранные как до глубины 20 см, так и до глубины 25 см [20, 21]. По данным Ramzaev et al. [20], слой почвы, полученный с глубины 20–25 см на двух огородах в Гомельской области в 2018 г., содержал около 6% общего запаса ¹³⁷Cs, находившегося в верхних 25 см почвы. Сходное среднее значение доли общего запаса ¹³⁷Cs для глубины 20–25 см (8%) можно вычислить по опубликованным результатам обследования [7], проведенного в 1996–2003 гг. на 22 огородах в Брянской области.

Небольшие различия между значениями A_{Cs} , полученными *in situ*, и значениями A_{Cs} , определенными по результатам анализа проб почвы, оказались статистически незначимыми (непараметрический тест Вилкоксона, $P > 0,05$). Вместе с тем, значения плотности загрязнения, определенные с использованием метода BUFCs и метода *ex situ*, хорошо коррелировали между собой: коэффициент ранговой корреляции Спирмена (R_{sp}) был равен 0,964 ($P < 0,01$). Графически соотношение между результатами, полученными с использованием двух методов, представлено на рисунке 2.

Метод BUFCs был разработан на основе анализа данных, полученных при обследовании участков со сравнительно высокими уровнями загрязнения почвы ¹³⁷Cs: 42–1940 кБк/м² (1,1–52,4 Ки/км²). Это является ограничением применения метода для территорий, не попадающих в зону радиоактивного загрязнения в связи с Чернобыльской аварией ($A_{Cs} < 1$ Ки/км²) [16]. Вместе с тем, было показано [16], что метод BUFCs может использоваться при самых разнообразных типах вертикального распределения ¹³⁷Cs в верхних 20–25 см почвы, например,

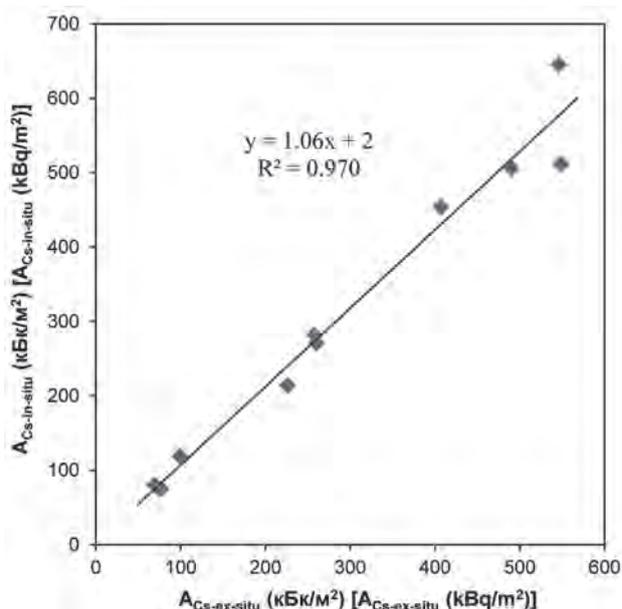


Рис. 2. Соотношение между значениями плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs, определенными с помощью лабораторного анализа проб почвы ($A_{Cs-ex-situ}$) и с помощью спектрометра-дозиметра MKS AT6101D в полевых условиях ($A_{Cs-in-situ}$) для 10 огородных участков, которые были обследованных в Брянской области в 2020 г.

[Fig. 2. Relationship between the values of ¹³⁷Cs soil contamination density determined with laboratory analysis of soil samples ($A_{Cs-ex-situ}$) and with the spectrometer-dosimeter MKS AT6101D *in situ* ($A_{Cs-in-situ}$) for 10 kitchen garden plots surveyed in the Bryansk region in 2020]

в том случае, когда четкий максимум удельной активности ¹³⁷Cs находится в верхних 2 см или когда такой максимум расположен на глубине несколько сантиметров. Как подтвердило наше исследование, метод BUFCs применим и для культивированных почв, в которых отмечается весьма равномерное распределение ¹³⁷Cs в верхних 15 см.

Заключение

В работе был валидирован метод BUFCs, разработанный международной группой исследователей [16] для определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-in-situ}}$) *in situ* с использованием портативного спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д. Для определения пригодности метода при исследовании огородной почвы нами были выбраны 10 представительных участков, расположенных в 6 населенных пунктах Брянской области. Территория населенных пунктов была сильно загрязнена ^{137}Cs в результате аварии на ЧАЭС: официально установленная плотность цезиевого загрязнения в 2017 г. находилась в диапазоне 111–511 Бк/м². На огородах были отобраны пробы почвы до глубины 20 см. В лаборатории с помощью стационарного гамма-спектрометра было определено содержание ^{137}Cs в каждом слое почвы и вычислены значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-ex-situ}}$).

Установлено, что полученные с помощью метода BUFCs значения $A_{\text{Cs-in-situ}}$ хорошо согласуются с результатами лабораторных анализов проб почвы и последующих вычислений $A_{\text{Cs-ex-situ}}$. Разброс значений отношения $A_{\text{Cs-in-situ}}/A_{\text{Cs-ex-situ}}$ находился в диапазоне 0,93–1,20 при средней величине 1,07.

Результаты исследования позволяют прийти к выводу о том, что метод, предложенный в работе [16], пригоден для определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах на отдаленном этапе после Чернобыльской аварии.

Благодарность

Авторы выражают благодарность А. Братилову за помощь, оказанную на этапе проведения полевых исследований.

Литература

1. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., и др. Средние годовые эффективные дозы облучения в 2014 году жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС (для целей зонирования населенных пунктов) // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 2. С. 32–128.
2. 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.
3. Романович И.К., Брук Г.Я., Барковский А.Н., и др. Обоснование Концепции перевода населенных пунктов, отнесенных в результате аварии на Чернобыльской АЭС к зонам радиоактивного загрязнения, к условиям нормальной жизнедеятельности населения // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 1. С. 6–18.
4. 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.
5. Hille R., Hill P., Heinemann K., et al. Current development of the human and environmental contamination in the Bryansk–Gomel spot due to the Chernobyl accident // Radiation and Environmental Biophysics. 2000. Vol. 39. P. 99–109.
6. 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.
7. 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.
8. Rostron P., Heathcote J.A., Ramsey M.H. Comparison between measurement methods for the characterisation of radioactively contaminated land. Workshop on Radiological Characterisation for Decommissioning, Nyköping, Sweden 17–19 April 2012.
9. Rostron P.D., Heathcote J.A., Ramsey M.H. Comparison between *in situ* and *ex situ* gamma measurements on land areas within a decommissioning nuclear site: a case study at Dounreay // Journal of Radiological Protection. 2014. Vol. 34, No. 3. P. 495–508.
10. ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements. Gamma-Ray Spectrometry in the Environment. ICRU report: No. 53. 1994. Bethesda, Maryland, USA.
11. Tyler A.N., Sanderson D.C.W., Scott E.M. Estimating and accounting for ^{137}Cs source burial through *In situ* gamma spectrometry in salt marsh environments // Journal of Environmental Radioactivity. 1996. Vol. 33. P. 195–212.
12. Chesnokov A.V., Govorun A.P., Fedin V.N., et al. Method and device to measure ^{137}Cs soil contamination in-situ // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1999. Vol. 420. P. 336–344.
13. Дровников В.В., Егоров М.В., Егоров Н.Ю., и др. *In situ* сцинтилляционный гамма-спектрометр с принципиально новыми возможностями. Некоторые результаты исследования содержания естественных и техногенных радионуклидов в грунте // АНПИ. 2011. Т. 64, № 1. С. 56–64.
14. Mikami S., Sato S., Hoshida Y., et al. *In situ* gamma spectrometry intercomparison in Fukushima, Japan // Japanese Journal of Health Physics. 2015. Vol. 50, No. 3. P. 182–188.
15. Varley A., Tyler A., Dowdall M., et al. An *in situ* method for the high resolution mapping of ^{137}Cs and estimation of vertical depth penetration in a highly contaminated environment // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 605–606. P. 957–966.
16. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106562>.
17. АТОМТЕХ. Спектрометр МКС-АТ6101Д. Электронный ре-супс: <https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/mks-at6101d.pdf> (Дата обращения: 12.09.2020).
18. 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.
19. Ramzaev V., Bernhardsson C., Barkovsky A., 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. Vol. 107. P. 14–22.
20. 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.

21. 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.
22. Bernhardsson C., Stenström K.E., Mattsson S., et al. Zero point assessment of the radiation environment – examples of a program applied in Sweden (ESS) and in Belarus (Belnp). Proceedings of International Conference “Medical Physics 2019” 7 – 9 November 2019, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania. 2019. P. 85–88.
23. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Метод идентификации участков целинных почв с помощью портативного гамма-спектрометра-дозиметра // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 123–128.

Поступила: 28.02.2021

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. Валидация метода определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах с использованием портативного спектрометра-дозиметра MKS AT6101D *in situ* // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 56–65. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-56-65

Validation of a method for *in situ* determination of ^{137}Cs soil contamination density in kitchen gardens using the portable spectrometer-dosimeter MKS AT6101D

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 collection of representative soil samples in the territory of settlements and subsequent measurements of the content of radionuclides in these samples under laboratory conditions (the so-called “ex situ method”) is a generally accepted technology for determining the density of soil contamination with ^{137}Cs in the populated areas contaminated due to the Chernobyl accident. Recently, as a supplement or alternative to the ex situ method, researchers are developing field (in situ) gamma-spectrometry methods. These methods allow determining the density of soil contamination with ^{137}Cs directly on site, without soil sampling and laboratory analysis. At the same time, the in situ methodology has several limitations, the most important of which is a lack of generally recognized metrological basis for measurements and interpretation of results. Hence, before using a particular technique and measuring device for carrying out large-scale in situ measurements, it is necessary to validate (to assess the suitability) of the selected in situ method using an established ex situ method. The aim of this study was to validate the method for determining the density of ^{137}Cs soil contamination in kitchen gardens using the MKS AT6101D spectrometer-dosimeter in situ. The method was recently presented by a Russian-Swedish-Belarusian group of researchers in an article published in the Journal of Environmental Radioactivity (<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106562>). To validate this method, we selected 10 representative kitchen garden plots. The plots were located in six settlements of the Bryansk region in Russia. The territory of the settlements had been heavily contaminated with ^{137}Cs as a result of the Chernobyl accident: the officially established levels of the density of soil contamination by ^{137}Cs ranged from 111 to 511 kBq/m²

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

in 2017. Field gamma-ray spectra were recorded at a height of 1 m above the ground in the center of kitchen garden plots using the MKS AT6101D device. The measurement duration was in the range of 1207–1801 s (the mean value = 1383 s). Samples of soil in the kitchen gardens were taken layer by layer (with a step of 5 cm) to a depth of 20 cm using a demountable cylindrical sampler. The ^{137}Cs content in each soil layer was determined in the laboratory using a stationary semiconductor gamma spectrometer. The values of the ^{137}Cs contamination density of the sampled soils ranged from 77 to 548 kBq/m². It was found that the results of the *ex situ* analyzes of soil samples were in a good agreement with the contamination density values obtained with the *in situ* method. On average, the difference between two methodologies was 7% (a maximum of 20%). The results of the study confirm that the method proposed by the international group is suitable for determining the density of soil contamination by ^{137}Cs in kitchen gardens in remote period after the Chernobyl accident.

Key words: ^{137}Cs , soil contamination density, kitchen garden, method *in situ*, validation.

References

1. Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Vlasov AYu, Goncharova YuN, 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), 2014. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(2): 32–128. (In Russian).
2. Bruk GYa, Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Vlasov AYu, 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).
3. Romanovich IK, Bruk GYa, Barkovsky AN, Bratilova AA, Gromov AV, Kaduka MV. Substantiation of the concept of transfer to conditions of normal population activity of the settlements considered to be zones of radioactive contamination after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(1): 6–18. (In Russian).
4. Orlov MYu, Snykov VP, Bochkov LP. Determination of average ground ^{137}Cs contamination. *Atomnaya Energiya = Atomic Energy*. 1994;76(3): 212–217. (In Russian).
5. Hille R, Hill P, Heinemann K, Ramzaev V, Barkovski A, Konoplia V, et al. Current development of the human and environmental contamination in the Bryansk–Gomel spot due to the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2000;39: 99–109.
6. 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).
7. 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.
8. Rostron P, Heathcote JA, Ramsey MH. Comparison between measurement methods for the characterisation of radioactively contaminated land. Workshop on Radiological Characterisation for Decommissioning, Nyköping, Sweden 17–19 April 2012.
9. Rostron PD, Heathcote JA, Ramsey MH. Comparison between *in situ* and *ex situ* gamma measurements on land areas within a decommissioning nuclear site: a case study at Dounreay. *Journal of Radiological Protection*. 2014;34 (3): 495–508.
10. ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements. Gamma-Ray Spectrometry in the Environment. ICRU report: No. 53. 1994. Bethesda, Maryland, USA.
11. Tyler AN, Sanderson DCW, Scott EM. Estimating and accounting for ^{137}Cs source burial through *In situ* gamma spectrometry in salt marsh environments. *Journal of Environmental Radioactivity*. 1996;33: 195–212.
12. Chesnokov AV, Govorun AP, Fedin VN, Ivanov OP, Liksonov VI, Potapov VN, et al. Method and device to measure ^{137}Cs soil contamination *in-situ*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1999;420: 336–344.
13. Drovnikov VV, Egorov MV, Egorov NY, Zhivun VM, Kadushkin AV, Kovalenko VV, et al. *In situ* gamma spectroscopy with basically new abilities. Some results of *In situ* determination of artificial and natural radionuclides concentrations in soils. *ANRI*. 2011;64(1): 56–64. (In Russian).
14. Mikami S, Sato S, Hoshide Y, Sakamoto R, Okuda N, Saito K. *In situ* gamma spectrometry intercomparison in Fukushima, Japan. *Japanese Journal of Health Physics*. 2015;50(3): 182–188.
15. Varley A, Tyler A, Dowdall M, Bondar Y, Zabrotsky V. An *in situ* method for the high resolution mapping of ^{137}Cs and estimation of vertical depth penetration in a highly contaminated environment. *Science of the Total Environment*. 2017;605–606: 957–966.
16. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106562>.
17. ATOMTEX, 2020. AT6101D spectrometer (in Russian). Available on: <https://atomtex.com/sites/default/files/data-sheets/mks-at6101d.pdf>. (Accessed 12 September 2020).
18. 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.
19. 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, $H^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation. *Radiation Measurements*. 2017;107: 14–22.
20. 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;214–215: 106168.
21. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Correlation between calculated and measured values of gamma dose rate in air in forests contaminated with ^{137}Cs : the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 37–46. (In Russian).

22. Bernhardsson C, Stenström KE, Mattsson S, Jönsson M, Pedehontaa-Hiia G, Rääf C, et al. Zero point assessment of the radiation environment – examples of a program applied in Sweden (ESS) and in Belarus (Belnpp). Proceedings of International Conference “Medical Physics 2019” 7 – 9 November 2019, *Kaunas University of Technology*, Kaunas, Lithuania. 2019, P. 85–88.
23. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Method for identifying areas of virgin soils using a portable gamma spectrometer-dosimeter. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 123–128. (In Russian).

Received: February 27, 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. Validation of a method for *in situ* determination of ¹³⁷Cs soil contamination density in kitchen gardens using the portable spectrometer-dosimeter MKS AT6101D. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 2. P. 56-65. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-56-65