

Experience of using the portable gamma spectrometer MKS AT6101D for *in situ* measurements of the density of ^{137}Cs soil contamination in the Bryansk region of Russia

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky

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

*We have tested applicability of the commercially available portable spectrometer-dosimeter MKS AT6101D (the manufacturer: АТОМТЕХ, Belarus) to measure the density of ^{137}Cs soil contamination (inventory of ^{137}Cs in soil) *in situ*. The study was performed in 2015–2020 at the territories of the Bryansk region of Russia contaminated due to the Chernobyl accident. The *in situ* measurements were performed in the 17 ground plots (7 grasslands and 10 kitchengargens) for which the ^{137}Cs inventory and the mean migration depth of the radionuclide in soil was available from laboratory (*ex situ*) measurements of soil samples. It was found that the *in situ* data obtained with the method that was provided by the manufacturer of the instrument required additional correction on the vertical distribution of ^{137}Cs in the soil. The correction procedure was developed; in 2020–2021, it has been successfully tested in 114 kitchengarden plots located at the settlements in the zones of radioactive contamination in the Bryansk region.*

Key words: *in situ*, gamma-spectrometry, soil, ^{137}Cs , inventory, verification, correction.

Опыт применения портативного гамма-спектрометра MKS AT6101D для измерения *in situ* плотности загрязнения почвы цезием-137 в Брянской области России

В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский

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

*Нами была проверена применимость серийно выпускаемого полевого переносного спектрометра-дозиметра MKS AT6101D (производитель АТОМТЕХ, Беларусь) для измерения *in situ* плотности загрязнения почвы ^{137}Cs . Исследования проводили в 2015–2020 гг. на территории Брянской области России, загрязненной в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Измерения *in situ* были выполнены на 17 участках (7 лугов и 10 огородов), для которых значения плотности загрязнения ^{137}Cs и средняя глубина миграции радионуклида в почве были известны из лабораторных (*ex situ*) измерений проб почвы. Выяснилось, что натурные данные, полученные по методике, предоставленной производителем прибора, в ряде случаев требуют дополнительной поправки на вертикальное распределение ^{137}Cs в почве. Метод коррекции был разработан и в 2020–2021 гг. успешно апробирован на 114 приусадебных огородных участках, расположенных в населенных пунктах зоны радиоактивного загрязнения Брянской области.*

Ключевые слова: *in situ*, гамма-спектрометрия, почва, плотность загрязнения, ^{137}Cs , верификация, коррекция.

Valery P. Ramzaev

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

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

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

Introduction

Field (*in situ*) gamma spectrometry is a common method for determining the density of soil contamination (Bq/m²) by technogenic gamma-emitting radionuclides [1–3]. The method can be used in practice as an element of the operational assessment of the radiation environment. In particular, it is applicable for a fast mapping of the contaminant distribution over vast territories [4–7]. Unlike the *ex situ* method, which includes collection of soil samples and their gamma spectrometric analysis in the laboratory [8], the *in situ* method allows obtaining data on the density of soil contamination by a radionuclide (or the radionuclide inventory) in the upper 20–30 cm soil layer directly in the field.

Significant disadvantages of the *in situ* method are difficulties with its metrological certification and the absence of generally recognized reference radioactive sources comparable with the IAEA certified reference radioactive materials that are intended for comparative *ex situ* measurements [9, 10]. In this regard, individual researchers or research groups use various land plots to verify measurement methods and/or conduct comparisons *in situ*. For such plots, the content and/or distribution of radionuclides in the soil are known from results of *ex situ* measurements [6, 11–14].

One of the commercially available serial devices with a built-in option for measuring the ¹³⁷Cs soil contamination density (A_{Cs}) *in situ* is the field portable gamma spectrometer-dosimeter MKS AT6101D (ATOMTEX, Belarus). The measurement range is 4–3700 kBq/m². Results of measurement (including a value of the statistical uncertainty) can be seen on the display of the control unit immediately after the measurement is completed. The basic function for A_{Cs} measurement is also available in the modern modification of the MKS AT6101DR instrument (<https://www.atomtex.com>). Note that the A_{Cs} quantity is still not related to the metrologically certified characteristics of this class of measuring instruments [15] and, accordingly, the A_{Cs} measurement results need to be verified and, if necessary, corrected.

The aim of this study was to verify results of measurements of the A_{Cs} value obtained using the MKS AT6101D device *in situ* ($A_{Cs-ATOMTEX}$) under conditions of radioactive contamination after the Chernobyl accident. Since devices of the MKS AT6101 series are quite widely used by different research groups [16–21], we expect that results of the verification of one of the built-in basic characteristics of the instrument will be useful not only to us, but also to other researchers.

Materials and methods

The main series of $A_{Cs-ATOMTEX}$ measurements was performed in 17 open land plots (7 meadows and 10 kitchen gardens) in the period 2015–2020 during complex expedition surveys [14, 22] of the zones of the Chernobyl radioactive contamination of the Bryansk region of Russia. As part of these surveys, a field gamma spectrum was measured at each site, and the peak area count rate for the 662 keV photons (PAR₆₆₂, pps) from ¹³⁷Cs–^{137m}Ba was determined [14, 22]. In addition, soil samples (layer by layer) were collected in each of these plots, and the density of soil contamination with ¹³⁷Cs ($A_{Cs-ex\ situ}$, kBq/m²) and the average depth of ¹³⁷Cs migration in the soil (Z , g/cm²) were obtained with *ex situ* analyses [14, 22].

The Z value was calculated using the formula:

Введение

Полевая (*in situ*) гамма-спектрометрия является достаточно распространенным методом определения плотности загрязнения почвы (Бк/м²) техногенными гамма-излучающими радионуклидами [1–3]. Этот метод может быть использован на практике как элемент оперативной оценки радиационной обстановки. В частности, он применим для быстрого построения карт распределения загрязнения на обширных территориях [4–7]. В отличие от метода *ex situ*, включающего отбор проб почвы и их гамма-спектрометрический анализ в лаборатории [8], метод *in situ* позволяет получать данные о плотности загрязнения почвы радионуклидом (или запасе радионуклида) в верхнем 20–30-сантиметровом слое непосредственно на месте по окончании измерения. Существенными недостатками метода *in situ* являются затруднения с его метрологической аттестацией и отсутствие общепризнанных референтных радиоактивных источников, сравнимых с сертифицированными референтными радиоактивными материалами МАГАТЭ, которые предназначены для сравнительных измерений *ex situ* [9, 10]. В этой связи отдельные исследователи или исследовательские группы используют для верификации методов измерений и/или проведения сличений *in situ* различные земляные участки, для которых по результатам измерений *ex situ* известны содержание и/или распределение радионуклидов в почве [6, 11–14].

Одним из коммерчески доступных серийных приборов, имеющих встроенную опцию измерения плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs (A_{Cs}) *in situ*, является портативный гамма-спектрометр дозиметр МКС АТ6101Д фирмы АТОМТЕХ (Беларусь). Диапазон измерений составляет 4–3700 кБк/м². Результаты (включая величину статистической неопределенности) могут быть выведены на дисплей блока управления непосредственно по окончании измерения. Базовая функция измерения A_{Cs} имеется и в современной модификации прибора МКС АТ6101ДР (<https://www.atomtex.com>). Отметим, что величина A_{Cs} до сих пор не относится к метрологически аттестованным характеристикам данного класса измерительных приборов [15], и соответственно, результаты измерений A_{Cs} нуждаются в верификации и, при необходимости, в коррекции.

Цель исследования – верификация результатов измерений величины A_{Cs} , полученной с помощью МКС АТ6101Д ($A_{Cs-ATOMTEX}$) в условиях радиоактивно загрязнения после Чернобыльской аварии. Так как приборы серии МКС АТ6101Д достаточно широко используют разные исследовательские группы [16–21], мы рассчитываем на то, что результаты этой верификации одной из встроенных базовых характеристик прибора будут полезны не только нам, но и другим исследователям.

Материалы и методы

Основная серия верификационных измерений $A_{Cs-ATOMTEX}$ была проведена на 17 открытых земляных участках (7 целинных лугов и 10 культивируемых огородов) в период 2015–2020 гг. во время комплексных экспедиционных обследований [14, 22] зон чернобыльского загрязнения территории Брянской области России. В рамках этих обследований на всех участках были измерены полевые гамма-спектры и определена скорость счета в пике полного поглощения первичных фотонов с энергией 662 кэВ

$$Z = Z_1 \times q_1 + Z_2 \times q_2 + \dots + Z_n \times q_n, \quad (1)$$

where Z_i (g/cm²) is the centre of the i -th layer in the soil profile and q_i is the portion (dimensionless) of $A_{Cs-ex\ situ}$ in the i -th layer.

An additional series of verification measurements of $A_{Cs-ATOMTEX}$ was performed at the territory of 46 settlements in the Bryansk region in 2020–2021. Totally, 114 private plots of arable land (kitchengardens) were surveyed in the settlements. The officially established average value of A_{Cs} (A_{Cs-off}) was known for each settlement. It ranged from 27 to 630 kBq/m² in the period of the survey [23]. For 92 of the 114 plots, the plot specific values of A_{Cs} (A_{Cs-BUF} kBq/m²) were determined [23] using another *in situ* method (BUF-method) that had been validated earlier [14, 24].

To perform the $A_{Cs-ATOMTEX}$ measurements, the detector of the MKS AT6101D instrument was placed on an aluminum tripod. The distance between the NaI(Tl) crystal and the soil surface was 1 m. The duration of a measurement was sufficient to ensure that the statistical uncertainty in the determination of $A_{Cs-ATOMTEX}$ did not exceed 5% (95% probability).

Statistical processing of the results was performed using EXCEL for Windows and an on-line free access platform (<https://www.socscistatistics.com>).

Results and discussion

A summary of data on the ¹³⁷Cs inventories determined *in situ* ($A_{Cs-ATOMTEX}$) and *ex situ* ($A_{Cs-ex\ situ}$) and the ratio of $A_{Cs-ATOMTEX}$ to $A_{Cs-ex\ situ}$ for the 17 land plots are provided in Table 1; it also contains results of calculations of Z and PAR_{662} .

The values of $A_{Cs-ex\ situ}$ varied from 69 to 1300 kBq/m², accordingly to [14, 22]. All values fall into the range of 4–3700 kBq/m², in which reliable results on the A_{Cs} determination *in situ* can be obtained accordingly to the ATOMTEX specification (<https://www.atomtex.com>).

The correlation between $A_{Cs-ex\ situ}$ and $A_{Cs-ATOMTEX}$ values was positive, strong and highly statistically significant (Spearman's coefficient, $R_{sp} = 0.970$, $P < 0.001$). Figure 1 illustrates the relationship. However, the absolute $A_{Cs-ATOMTEX}$ values were on av-

от ¹³⁷Cs–^{137m}Ba (PAR_{662} , имп/с) [14, 22]. Кроме того, на этих участках до глубины 20 см были послойно отобраны пробы почвы и по результатам лабораторных исследований получены данные о плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs ($A_{Cs-ex\ situ}$, kBк/м²) и средней глубине миграции ¹³⁷Cs в почве (Z , г/см²) [14, 22].

Величину Z вычисляли по формуле:

$$Z = Z_1 \times q_1 + Z_2 \times q_2 + \dots + Z_n \times q_n, \quad (1)$$

где Z_i (г/см²) – глубина центра i -го слоя в профиле почвы; q_i – доля (безразмерная величина) $A_{Cs-ex\ situ}$ в i -м слое.

Дополнительная серия верификационных измерений $A_{Cs-ATOMTEX}$ была проведена на 114 приусадебных огородных участках, расположенных в 46 населенных пунктах (НП) зоны радиоактивного загрязнения Брянской области. Для каждого НП было известно официально установленное среднее значение плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs (A_{Cs-off}). В период обследования оно находилось в диапазоне от 27 до 630 kBк/м² [23]. Для 92 из 114 площадок индивидуальное значение A_{Cs} (A_{Cs-BUF} kBк/м²) было определено *in situ* [23] с использованием другого метода (BUF-метод), который был валидирован ранее [14, 24].

Для проведения измерений $A_{Cs-ATOMTEX}$ детектор прибора MKS AT6101D размещали кристаллом NaI(Tl) вниз на алюминиевом треножнике на высоте 1 м над поверхностью почвы. Продолжительность измерений была достаточна для того, чтобы статистическая неопределенность измерения $A_{Cs-ATOMTEX}$ не превышала 5% (95% вероятности).

Статистическую обработку результатов проводили с помощью EXCEL for Windows и on-line платформы свободного доступа (<https://www.socscistatistics.com>).

Результаты и обсуждение

Сводка данных по плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs, определенной *in situ* ($A_{Cs-ATOMTEX}$) и *ex situ* ($A_{Cs-ex\ situ}$), а также отношение $A_{Cs-ex\ situ}$ к $A_{Cs-ATOMTEX}$ представлены в таблице 1. Результаты расчетов Z и измерений PAR_{662} также даны в таблице 1.

По данным [14, 22], значения $A_{Cs-ex\ situ}$ варьировали от

Table 1

Summary statistics on the inventory of ¹³⁷Cs in soil (A_{Cs}) determined *in situ* with the ATOMTEX method ($A_{Cs-ATOMTEX}$) and *ex situ* with soil samples ($A_{Cs-ex\ situ}$), ratio of $A_{Cs-in\ situ}$ to $A_{Cs-ex\ situ}$, the mean migration depth of ¹³⁷Cs in soil determined *ex situ* (Z), and the count rate in the 662 keV peak (PAR_{662}) for the 17 open land plots surveyed in the Bryansk region in 2015–2020

[Таблица 1

Сводная статистика по плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs (A_{Cs}), определенной *in situ* методом ATOMTEX ($A_{Cs-ATOMTEX}$) и *ex situ* по пробам почвы ($A_{Cs-ex\ situ}$), соотношение $A_{Cs-in\ situ}$ и $A_{Cs-ex\ situ}$, средняя глубина миграции ¹³⁷Cs в почве, определенная *ex situ* (Z), и скорость счета импульсов в пике 662 кэВ (PAR_{662}) для 17 открытых земельных участков, обследованных в Брянской области в 2015–2020 гг.]

Parameter [Параметр]	A_{Cs} (kBq/m ² [kBк/м ²])		$A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-ex\ situ}$	Z (g/cm ² [г/см ²])*	PAR_{662} (pps [имп/с])*
	ATOMTEX	<i>ex situ</i> *			
Minimum [Минимум]	23	69	0.28	2.2	14
Maximum [Максимум]	1400	1300	1.19	15.6	800
Median [Медиана]	185	546	0.35	14.4	95
Mean [Средняя]	390	541	0.58	10.5	216
S.d. [с.о.]	401	381	0.34	5.6	228
CV, % [КВ, %]	103	70	59	53	105

* – according to [14, 22]. [* – по данным [14, 22].]

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

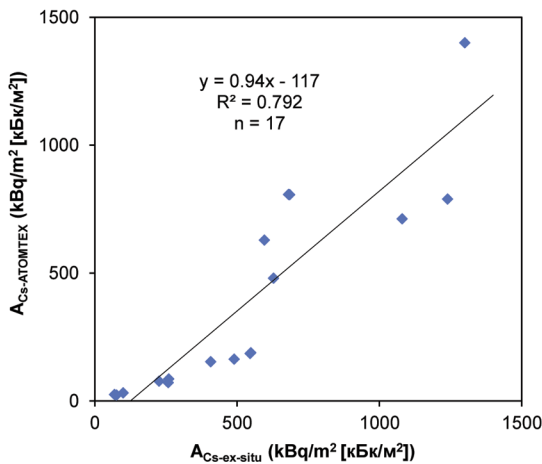


Fig. 1. The comparison between the inventory of ^{137}Cs in soil measured *in situ* with the ATOMTEX method ($A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$) and the inventory of ^{137}Cs in soil derived *ex situ* using soil samples ($A_{\text{Cs-ex situ}}$) for open ground plots surveyed in the Bryansk region in 2015–2020

[Рис. 1.] Сравнение плотности загрязнения почвы ^{137}Cs , измеренной *in situ* методом ATOMTEX ($A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$), и плотности загрязнения почвы ^{137}Cs , определенной *ex situ* с использованием образцов почвы ($A_{\text{Cs-ex situ}}$) для открытых земельных участков, обследованных в Брянской области в 2015–2020 гг.]

erage lower by a factor of 1.7 (range 0.84–3.6) compared to the $A_{\text{Cs-ex situ}}$ values.

To find the reason for the discrepancy between the absolute results of the *in situ* and *ex situ* measurements at the 17 surveyed sites, we decided to study the relationship between: 1) the $A_{\text{Cs-ex situ}}/A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ ratio and Z ; 2) $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ and PAR_{662} .

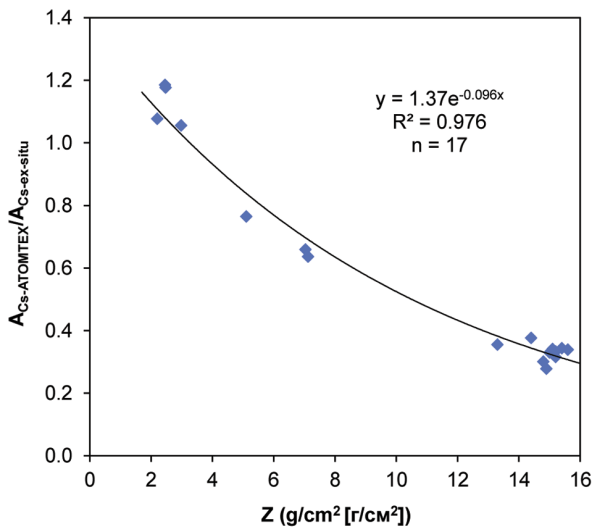


Fig. 2. The relationship between the mean migration depth of ^{137}Cs in soil (Z) and the ratio of inventory of ^{137}Cs in soil determined *ex situ* using soil samples ($A_{\text{Cs-ex situ}}$) [14, 22] to inventory of ^{137}Cs in soil determined *in situ* with the ATOMTEX method ($A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$) for ground plots surveyed in the Bryansk region in 2015–2020

[Рис. 2.] Соотношение между средней глубиной миграции ^{137}Cs в почве (Z) и отношением запаса ^{137}Cs в почве, определенного *ex situ* с использованием образцов почвы ($A_{\text{Cs-ex situ}}$) [14, 22], к запасу ^{137}Cs в почве, определенному *in situ* с помощью метода ATOMTEX ($A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$) для земельных участков, обследованных в Брянской области в 2015–2020 гг.]

69 до 1300 кБк/м². Все значения попадают в диапазон 4–3700 кБк/м², в котором могут быть получены надежные результаты по определению A_{Cs} *in situ* в соответствии со спецификацией ATOMTEX (<https://www.atomtex.com>).

Корреляция между значениями A_{Cs} *ex situ* и *in situ* была положительной, сильной и высоко статистически значимой (коэффициент Спирмена, $R_{\text{Sp}} = 0,970$, $P < 0,001$). Рисунок 1 (левая панель) иллюстрирует эту связь. Вместе с тем, абсолютные значения $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ были в среднем в 1,7 раза ниже (диапазон 0,84–3,6), чем значения $A_{\text{Cs-ex situ}}$.

Чтобы найти причину расхождения между абсолютными результатами измерений A_{Cs} *in situ* и *ex situ* на 17 обследованных площадках, мы решили изучить взаимосвязь между: 1) соотношением $A_{\text{Cs-ex situ}}/A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и Z ; 2) $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и PAR_{662} . Между отношением $A_{\text{Cs-ex situ}}/A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и Z была обнаружена положительная и сильная корреляция ($R_{\text{Sp}} = 0,817$, $P < 0,001$). Рисунок 2 иллюстрирует взаимосвязь между двумя переменными. Это соотношение может быть хорошо аппроксимировано экспоненциальной функцией (коэффициент детерминации $R^2 = 0,876$). Линия аппроксимации показывает, что соотношение около 1:1 между $A_{\text{Cs-ex situ}}$ и $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ соответствует диапазону 3–4 г/см² для величины Z . При значениях Z менее 3 г/см² метод ATOMTEX завышает истинную плотность загрязнения ^{137}Cs , а при значениях Z выше 4 г/см² наблюдается занижение A_{Cs} . Была выявлена положительная и высоко статистически значимая корреляция между $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и PAR_{662} ($R_{\text{Sp}} = 0,995$, $P < 0,001$). Эта почти идеальная линейная зависимость между двумя переменными проиллюстрирована на рисунке 3.

Проведенный анализ показывает, что значение A_{Cs} , определенное методом ATOMTEX, прямо пропорционально связано со скоростью счета в пике 662 кэВ, которая является приборным отражением плотности потока фотонов с энергией 662 кэВ в воздухе в месте измерения. Очевидно, что метод ATOMTEX не учитывает весьма выраженную изменчивость глубины миграции ^{137}Cs в почве. Опция, предложенная производителем прибора МКС АТ6101Д, может быть напрямую применена для предварительной оценки A_{Cs} только при средней глубине миграции ^{137}Cs (Z), находящейся в диапазоне 3–4 г/см². Такое сравнительно небольшое заглубление источника излучения в почве в настоящее время можно встретить в некоторых случаях в лесах и на целинных лугах [22, 24]. В то же время наши расчеты показывают, что отношение $A_{\text{Cs-ex situ}}/A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ хорошо коррелирует со средней глубиной миграции ^{137}Cs в почве. Это позволяет нам предложить процедуру коррекции значения $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ для более точной оценки фактического значения A_{Cs} .

Для получения скорректированного значения $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ можно использовать соотношение между $A_{\text{Cs-ex situ}}/A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и Z (см. рис. 2):

$$A_{\text{Cs-ATOMTEX-cor}} = A_{\text{Cs-ATOMTEX}} / CF_Z \quad (2)$$

где $A_{\text{Cs-ATOMTEX-cor}}$ – фактический запас ^{137}Cs в верхних 20 см почвы (кБк/м²); $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ – измеренное прибором МКС АТ6101Д значение A_{Cs} (кБк/м²); CF_Z – эмпирический поправочный коэффициент (безразмерный).

Поправочный коэффициент CF_Z рассчитывается по эмпирической формуле (см. рис. 2):

$$CF_Z = K \times e^{-D \times Z} \quad (3)$$

A positive and strong correlation ($R_{Sp} = 0.817$, $P < 0.001$) was found between the $A_{Cs-ex\ situ}/A_{Cs-ATOMTEX}$ ratio and Z . Figure 2 illustrates the comparison between two variables. This relationship can be well approximated by an exponential function (coefficient of determination $R^2 = 0.876$). The approximation line indicates that the 1:1 ratio between $A_{Cs-ex\ situ}$ and $A_{Cs-ATOMTEX}$ is in the range of 3–4 g/cm² for Z value. At the Z values lower than 3 g/cm², the ATOMTEX method overestimates the true ¹³⁷Cs inventory, while at the Z values higher than 4 g/cm², an underestimation of A_{Cs} is observed. A positive and highly statistically significant correlation was determined between $A_{Cs-ATOMTEX}$ and PAR_{662} ($R_{Sp} = 0.995$, $P < 0.001$). The nearly linear relationship between two variables is illustrated in Figure 3.

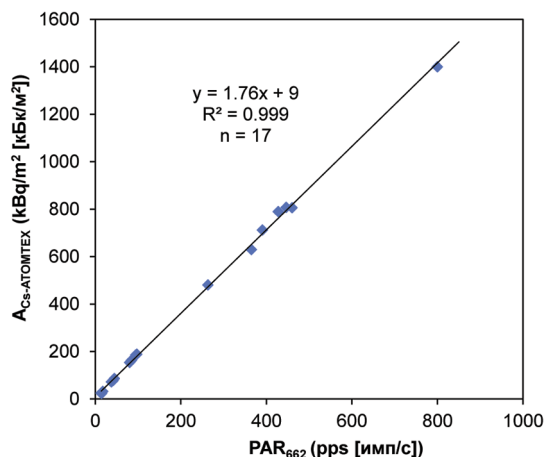


Fig. 3. The relationship between count rate in the 662 keV peak (PAR_{662}) [14, 22] and inventory of ¹³⁷Cs in soil determined *in situ* with the ATOMTEX method ($A_{Cs-ATOMTEX}$) for the ground plots that were surveyed in the Bryansk region in 2015–2020

Рис. 3. Взаимосвязь между скоростью счета в пике 662 кэВ (PAR_{662}) [14, 22] и запасом ¹³⁷Cs в почве, определенным *in situ* методом ATOMTEX ($A_{Cs-ATOMTEX}$) для земельных участков, которые были обследованы в Брянской области в 2015–2020 гг.]

The performed analysis shows that the A_{Cs} value determined *in situ* with the ATOMTEX method is directly proportional to the count rate in the 662 keV peak that is the device reflection of the 662 keV photon fluence rate in the air at the place of measurement. The ATOMTEX method does not consider the migration depth of ¹³⁷Cs in the soil. The option provided by the manufacturer of the MKS AT6101D device can be applied for a preliminary estimation of A_{Cs} only when the mean migration depth of ¹³⁷Cs (Z) is in the range of 3–4 g/cm². Such a relatively shallow bedding of the radiation source in the soil can currently be found only in forests and virgin meadows [22, 24]. At the same time, our calculations show, that the $A_{Cs-ex\ situ}/A_{Cs-ATOMTEX}$ ratio correlates well with the mean migration depth of ¹³⁷Cs in the soil (Z value). It allows us to propose a correction procedure to more accurately estimate the actual A_{Cs} value.

To obtain corrected value of $A_{Cs-ATOMTEX}$, the relationship between $A_{Cs-ex\ situ}/A_{Cs-ATOMTEX}$ ratio and Z (Fig. 2) can be employed:

$$A_{Cs-ATOMTEX-cor} = A_{Cs-ATOMTEX} / CF_Z, \quad (2)$$

where $A_{Cs-ATOMTEX-cor}$ is the actual inventory of ¹³⁷Cs in the top 20 cm of soil (kBq/m²); $A_{Cs-ATOMTEX}$ is the MKS AT6101D measured value of A_{Cs} (kBq/m²); CF_Z is the empirical correction factor (dimensionless).

где K — эмпирический коэффициент (безразмерный); Z — средняя глубина миграции ¹³⁷Cs в почве (г/см²); D — эмпирический коэффициент (см²/г).

Эмпирически выведенные значения K и D составляют 1,37 и 0,096 см²/г соответственно. Отметим, что эти численные величины справедливы для значений Z , находящихся в диапазоне 2–16 г/см².

Предлагаемая процедура коррекции требует определенных знаний о вертикальном распределении ¹³⁷Cs в почве. Теоретически определение вертикального распределения радионуклида, выполненное по небольшому количеству репрезентативных проб почвы на конкретном участке (или в локации), может быть основой для последующего детального измерения и коррекции $A_{Cs-ATOMTEX}$ на всей территории. При этом, конечно, следует обоснованно предполагать, что изменчивость вертикального распределения радионуклида в почве на выбранном участке (в локации) невелика.

Огород (приусадебный участок культивируемой земли) является той локацией, где в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС можно обнаружить относительно небольшую вариабельность значения Z . В частности, по результатам обследования 52 приусадебных участков в Брянской области России в 1996–2003 гг. [25] коэффициент вариации величины Z можно принять равным 13% (среднее значение $Z = 15,7$ г/см², стандартное отклонение = 2,1 г/см²). Поэтому на втором этапе верификационных измерений мы решили проверить правильность предложенной процедуры коррекции значений $A_{Cs-ATOMTEX}$ на локации «Огород». Как было указано выше, всего в 46 НП обследовано 114 приусадебных огородных участков. Значения Z , вычисленные на основе данных по вертикальному распределению ¹³⁷Cs в почве на 10 репрезентативных опробованных участков [14], колебалось от 13,2 до 15,7 г/см² (среднее ± стандартное отклонение = 14,9±0,7 г/см², сырая масса почвы). Отсюда среднее значение поправочного коэффициента CF_Z можно рассчитать по формуле (3) следующим образом: $1,37 \times e^{-0,096 \cdot 14,9} = 0,33$.

Результаты измерений $A_{Cs-ATOMTEX}$ на 114 участках в сопоставлении со значениями A_{Cs-off} приведены на рисунке 4 (панель а) и в таблице 2. Как видно из рисунка 4, $A_{Cs-ATOMTEX}$ и A_{Cs-off} хорошо коррелируют друг с другом ($R_{Sp} = 0,890$; $P < 0,001$). Вместе с тем, оказалось, что значения A_{Cs} , измеренные с помощью MKS AT6101D, в среднем были в 3 раза ниже официально установленных значений плотности загрязнения ¹³⁷Cs почвы территории НП. После применения корректирующего коэффициента ($CF_Z = 0,33$), который был выведен выше, среднее соотношение $A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-off}$ приблизилось к 1 (см. рис. 4 (панель б) и табл. 2). Весьма заметные отклонения (до 3 раз) скорректированных значений $A_{Cs-ATOMTEX}$ на отдельных участках от среднего значения A_{Cs-off} установленного для НП, в известной мере объясняются неравномерностью изначальных выпадений ¹³⁷Cs по площади НП. По данным М.Ю. Орлова и др. [26], разброс значений A_{Cs} между отдельными площадками отбора проб почвы в пределах одного и того же НП может достигать 10 и более раз. В этой связи представляет интерес проанализировать результаты индивидуального обследования 92 огородных участков, где измерения A_{Cs} были проведены одновременно с использованием метода ATOMTEX и BUF-метода (рис. 5,

The correction factor, CF_z , is calculated using the empirical formula (Fig. 2):

$$CF_z = K \times e^{-D \times Z}, \quad (3)$$

where K is the empirical coefficient (dimensionless); Z is the mean migration depth of ^{137}Cs in soil (g/cm^2); D is the empirical coefficient (cm^2/g).

The empirically derived values for K and D are 1.37 and 0.096 cm^2/g , respectively. Note that these numerical values are valid for Z values in the range of 2–16 g/cm^2 .

The proposed correction procedure requires certain knowledge about vertical distribution of ^{137}Cs in the soil. Theoretically, determining the vertical distribution of the radionuclide from a limited number of representative soil samples in a particular area (location) of the radiological survey may be the basis for subsequent detailed measurement and correction of $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ throughout the whole area. In this case, of course, it should be reasonably assumed that a variability of the vertical distribution of the radionuclide in the soil profile in the selected area is small.

Kitchengarden (a private plot of arable land) is the location where one can find a relatively narrow variability between individual plots with respect of Z in the remote period after the Chernobyl accident. Specifically, according to the results of a survey of 52 kitchengarden plots in the Bryansk region of Russia in 1996–2003 [25], a coefficient of variation of Z can be calculated as 13% (mean = 15.7 g/cm^2 , standard deviation = 2.1 g/cm^2). Therefore, at the second stage of the verification measurements, we decided to check the validity of the proposed correction procedure for $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ values at the location “kitchengarden”.

As mentioned above, a total of 114 kitchengarden plots were surveyed in 46 settlements. The Z values, that were calculated from data on the vertical distribution of ^{137}Cs in soil for 10 representative sampled sites [14], ranged from 13.2 to 15.7 g/cm^2 (mean \pm standard deviation = 14.9 \pm 0.7 g/cm^2 , wet weight of soil). From here, the average value of the correction factor, CF_z , can be calculated using formula (3) as follows: $1.37 \times e^{-0.096 \times 14.9} = 0.33$.

Results of measurements $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ in the 114 sites, in comparison with the $A_{\text{Cs-off}}$ values, are shown in Figure 4 (panel a) and in Table 2. As can be seen from Figure 4, $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ and $A_{\text{Cs-off}}$ correlate well with each other ($R_{\text{Sp}} = 0.890$; $P < 0.001$). At the same time, it turned out that the A_{Cs} values measured with the MKS AT6101D were, on average, lower by a factor of 3 compared to the officially established values for the density of ^{137}Cs contamination of the soil at the territory of the settlements. After applying the Z correction factor derived above ($CF_z = 0.33$), the average $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}/A_{\text{Cs-off}}$ ratio approached 1:1 (see Fig. 4 (panel b) and Table 2). Quite noticeable deviations (up to a factor of 3) of the corrected $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ values from the average $A_{\text{Cs-off}}$ value in some plots are to a certain extent explained by the unevenness of the initial ^{137}Cs fallout over the area of settlements. According to Orlov et al. [26], more than 10-fold differences between individual soil sampling sites in the A_{Cs} values can be found within the same settlement. In this regard, it is of interest to analyze the results of an individual survey of 92 garden plots, where A_{Cs} measurements were performed simultaneously using the ATOMTEX-method and the BUF-method (Fig. 5, Table 3). The $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ and $A_{\text{Cs-BUF}}$ results were more strongly correlated with

табл. 3). Показатели $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ и $A_{\text{Cs-BUF}}$ более сильно коррелировали друг с другом ($R_{\text{Sp}} = 0,938$), по сравнению с парой $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}-A_{\text{Cs-off}}$ ($R_{\text{Sp}} = 0,890$), а коэффициент вариации для отношения $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}/A_{\text{Cs-BUF}}$ (22%) был, напротив, существенно меньше, чем таковой (40%) для пары $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}-A_{\text{Cs-off}}$. Однако в среднем результаты измерений A_{Cs} с использованием метода ATOMTEX оказались сильно заниженными (в 3 раза) по отношению к результатам, полученным с помощью BUF-метода. Применение предложенной процедуры коррекции к $A_{\text{Cs-ATOMTEX}}$ весьма показательно исправило ситуацию (см. рис. 5), и среднее соотношение $A_{\text{Cs-ATOMTEX-corr}}/A_{\text{Cs-BUF}}$ приблизилось к единице (см. табл. 3, колонка 6). Заметное отклонение некоторых точек от отношения 1:1 может быть связано с использованием среднего значения Z для получения $A_{\text{Cs-ATOMTEX-corr}}$ на всех 92 участках, в то время как значения $A_{\text{Cs-BUF}}$ были выведены по значениям Z , рассчитанными для каждого отдельно взятого участка [23].

Заключение

Проведенное сравнительное исследование выявило существенные ограничения в применении предлагаемой разработчиком прибора MKS AT6101D опции определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs}) *in situ*. Получение корректных значений A_{Cs} с использованием этой опции возможно только в том случае, если средняя глубина миграции радионуклида в почве (Z) составляет около 3–4 $\text{г}/\text{см}^2$. Такое сравнительно небольшое заглубление источника излучения в почве в настоящее время можно встретить в некоторых случаях в лесах и на целинных лугах. На культивируемых землях при значительном заглублении радионуклида и нарастании значения Z прибор дает заниженные (до 3,5 раз) показатели A_{Cs} . Для коррекции значения A_{Cs} , полученного с помощью прибора MKS AT6101D, предложена процедура, которая основана на использовании величины Z . Данная процедура успешно опробована на огородных участках, расположенных в зоне радиоактивного загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС. Тем не менее, в настоящее время (без метрологической аттестации) использование опции определения A_{Cs} с помощью прибора MKS AT6101D можно рекомендовать только для предварительной оперативной оценки радиоактивного загрязнения территории.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Рамзаев В.П. – концептуализация, измерения, написание черновика рукописи.

Барковский А.Н. – концептуализация, редактирование рукописи.

Благодарности

Авторы благодарят младшего научного сотрудника К.В. Варфоломееву и научного сотрудника А.А. Братилкову (ФБУН НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева) за помощь при проведении полевых измерений.

Информация о конфликте интересов

У авторов нет конфликтов интересов, которые следует раскрывать.

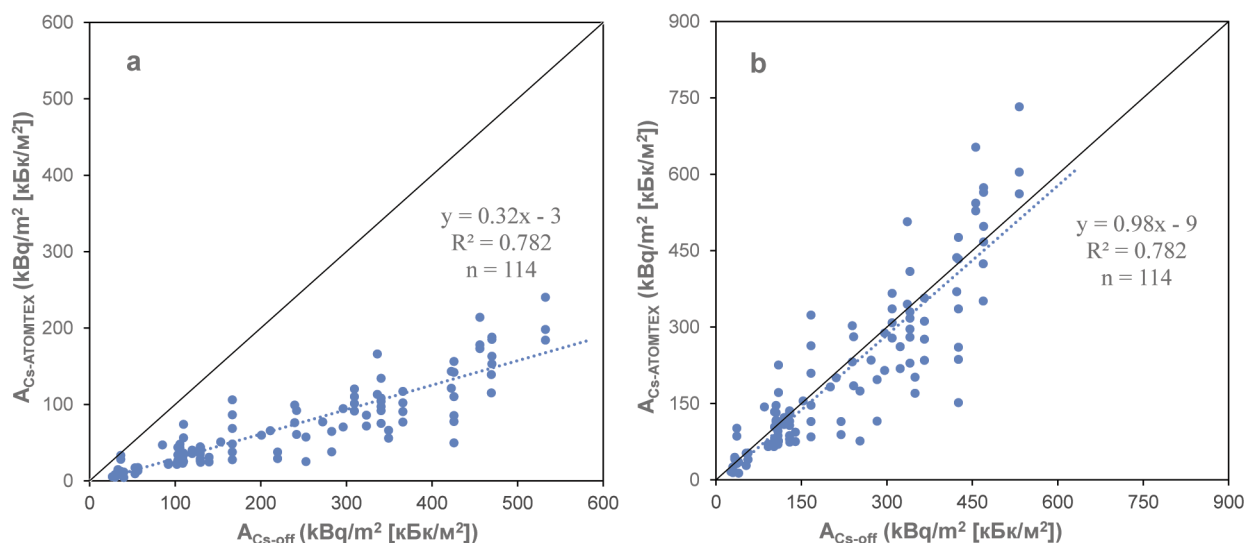


Fig. 4. The comparison between the officially established average value of A_{Cs} for a settlement (A_{Cs-off}) [23] and the A_{Cs} value measured *in situ* at kitchengardens with the MKS AT6101D device using the option provided by the device manufacturer ($A_{Cs-ATOMTEX}$); panel “a” demonstrates the measured values of $A_{Cs-ATOMTEX}$ and panel “b” demonstrates the $A_{Cs-ATOMTEX}$ values corrected for the average mean migration depth of ^{137}Cs in soil ($Z = 14.9$ g/cm²). 114 plots in 46 settlements of the Bryansk region in 2020–2021. The data are provided on the day of *in situ* measurement

[Рис. 4. Сравнение официально установленного среднего значения A_{Cs} для населенного пункта (A_{Cs-off}) [23] и значения A_{Cs} , измеренного *in situ* на огородах прибором MKS AT6101D с использованием опции производителя прибора ($A_{Cs-ATOMTEX}$); панель «а» демонстрирует измеренные значения $A_{Cs-ATOMTEX}$, а панель «б» демонстрирует значения $A_{Cs-ATOMTEX}$, скорректированные на среднюю глубину миграции ^{137}Cs в почве ($Z = 14,9$ г/см²). 114 участков в 46 населенных пунктах Брянской области в 2020–2021 гг. Данные представлены на день измерения]

Table 2

Summary statistics on inventory of ^{137}Cs in soil (A_{Cs}) officially established for a settlement (A_{Cs-off}) and determined *in situ* with the ATOMTEX method for a kitchengarden: uncorrected values ($A_{Cs-ATOMTEX}$) and the Z-corrected values ($A_{Cs-ATOMTEX-cor}$). The 114 kitchengarden plots surveyed in 46 settlements in the Bryansk region in 2020–2021

[Таблица 2

Сводная статистика по плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs}), официально установленной для населенного пункта (A_{Cs-off}) и определенной *in situ* методом ATOMTEX на огороде: нескорректированные значения ($A_{Cs-ATOMTEX}$) и значения с поправкой на Z ($A_{Cs-ATOMTEX-cor}$). 114 приусадебных участков, обследованных в 46 населенных пунктах Брянской области в 2020–2021 гг.]

Parameter [Параметр]	A_{Cs} (kBq/m ² [кБк/м ²])			Ratio [Отношение]	
	$A_{Cs-ATOMTEX}$	$A_{Cs-ATOMTEX-cor}$	A_{Cs-off} *	$A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-off}$	$A_{Cs-ATOMTEX-cor}/A_{Cs-off}$
Minimum [Минимум]	4.3	13	27	0.10	0.30
Maximum [Максимум]	240	732	533	0.90	2.76
Median [Медиана]	50	153	167	0.30	0.91
Mean [Средняя]	70	213	227	0.31	0.95
S.d. [с.о.]	53	162	146	0.12	0.38
CV,% [KB,%]	76	76	64	40	40

* – according to [23]. [* – по данным [23].

SD – standard deviation [C.o. – стандартное отклонение]; CV – coefficient of variation (%) [KB – коэффициент вариации (%)].

each other ($R_{Sp} = 0.938$) compared to the $A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-off}$ pair results ($R_{Sp} = 0.890$). The coefficient of variation for the $A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-BUF}$ ratio (22%) was, on the contrary, significantly less than that (40%) for the $A_{Cs-ATOMTEX}/A_{Cs-off}$ pair. However, on average, the A_{Cs} values deduced using the ATOMTEX-method turned out to be strongly underestimated (by a factor of 3), compared with the BUF-method values. The application of the proposed correction factor led to a significant improvement of the situation (Fig. 5), and the average $A_{Cs-ATOMTEX-cor}/A_{Cs-BUF}$ ratio approached to approximately 1:1 (Table 3, column 6). The vis-

Сведения об источниках финансирования

Финансирование работы частично осуществлялось по контракту № 0173100001419000019 с Роспотребнадзором.

Литература

1. ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements. Gamma-Ray Spectrometry in the Environment. ICRU report: 53. 1994. Bethesda, Maryland, USA.

ible deviation of some points from the 1:1 ratio can be attributed to using the mean value of Z for derivation of $A_{Cs-ATOMTEX-corr}$ at all 92 plots, while the A_{Cs-BUF} values were deduced with the Z value calculated for each individual plot [23].

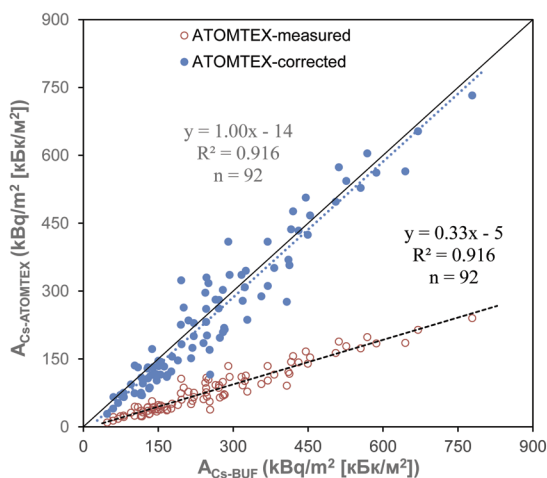


Fig. 5. The comparison between A_{Cs} determined *in situ* using the BUF-method (A_{Cs-BUF}) [23] and the option provided by the device MKS AT6101D manufacturer ($A_{Cs-ATOMTEX}$); the relationship is shown for the originally measured values of $A_{Cs-ATOMTEX}$ (ATOMTEX-measured) and the values corrected for the average mean migration depth of ^{137}Cs in soil, $Z = 14,9 \text{ g/cm}^2$ (ATOMTEX-corrected). 92 plots in the 39 settlements of the Bryansk region in 2020–2021. The data are provided on the day of measurement

Рис. 5. Сравнение A_{Cs} , определенного *in situ* с использованием BUF-метода (A_{Cs-BUF}) [23] и опции, предоставленной производителем прибора MKS AT6101D ($A_{Cs-ATOMTEX}$); зависимость показана для первоначально измеренных значений $A_{Cs-ATOMTEX}$ (ATOMTEX-measured) и значений, скорректированных на среднюю глубину миграции ^{137}Cs в почве, $Z = 14,9 \text{ г/см}^2$ (ATOMTEX-corrected). 92 участка в 39 населенных пунктах Брянской области в 2020–2021 гг. Данные представлены на день измерения]

Conclusion

The conducted analysis revealed significant limitations in the use of the option proposed by the manufacturer of the

2. 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, No. 3, P. 195–212.
3. 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.
4. 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.
5. Tyler A. High accuracy *in situ* radiometric mapping // Journal of Environmental Radioactivity. 2004. Vol. 72, No. 1–2. P. 195–202.
6. Mikami S., Sato S., Hoshide Y., et al. *In situ* gamma spectrometry intercomparison in Fukushima, Japan // Japanese Journal of Health Physics. 2015. Vol. 50, No. 3. P. 182–188.
7. Mikami S., Ishikawa D., Matsuda H., et al. Guidance for *in situ* gamma spectrometry intercomparison based on the information obtained through five intercomparisons during the Fukushima mapping project // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 210. P. 105938.
8. 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.
9. IAEA – International Atomic Energy Agency. Certified Reference Materials for Radioactivity Measurements in Environmental Samples of Soil and Water. URL: <https://www.iaea.org/publications/8595/certified-reference-materials-for-radioactivity-measurements-in-environmental-samples-of-soil-and-water>. (Дата обращения: 18.06.2023).
10. IAEA – International Atomic Energy Agency. Certified reference material IAEA-385: natural and artificial radionuclides in sediment from the Irish Sea. URL: https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Shared%20Documents/ReferenceMaterials/Radionuclides/IAEA-385/RS_IAEA-385_V5.3.pdf. (Дата обращения: 18.06.2023).
11. Miller K.M., Shebell P., Monetti M.A., et al. An intercomparison of *in situ* gamma-ray spectrometers // Radioactivity and Radiochemistry. 1998. Vol. 9, No. 4. P. 27–40.
12. Dowdall M., Bondar Yu., Frstrup P., et al. In-situ Gamma Spectrometry Field Activity – Chernobyl (GAMFAC). NKS-

Table 3

Summary statistics on inventory of ^{137}Cs in soil (A_{Cs}) determined *in situ* with the BUF-method (A_{Cs-BUF}) and the ATOMTEX method: uncorrected values ($A_{Cs-ATOMTEX}$) and the Z-corrected values ($A_{Cs-ATOMTEX-corr}$). The 92 kitchen garden plots surveyed in 39 settlements in the Bryansk region in 2020–2021

Таблица 3

Сводная статистика по плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs}), определенной *in situ* на огородах методом BUF (A_{Cs-BUF}) и методом АТОМТЕХ: нескорректированные значения ($A_{Cs-ATOMTEX}$) и значения с поправкой на Z ($A_{Cs-ATOMTEX-corr}$). 92 приусадебных участка, обследованных в 39 населенных пунктах Брянской области в 2020–2021 гг.]

Parameter [Параметр]	A_{Cs} (kBq/m ² [кБк/м ²])			Ratio[Отношение]	
	$A_{Cs-ATOMTEX}$	$A_{Cs-ATOMTEX-corr}$	A_{Cs-BUF} *	$A_{Cs-ATOMTEX} / A_{Cs-BUF}$	$A_{Cs-ATOMTEX-corr} / A_{Cs-BUF}$
Minimum [Минимум]	9.2	28	48	0.15	0.45
Maximum [Максимум]	240	732	779	0.54	1.65
Median [Медиана]	67	205	231	0.30	0.93
Mean [Средняя]	80	245	259	0.30	0.92
S.d. [с.о.]	53	160	153	0.07	0.21
CV,% [КВ,%]	66	66	59	22	22

* – according to [23]. [* – по данным [23]].

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

MKS AT6101D instrument for determining the density of soil contamination with ^{137}Cs (A_{Cs}) *in situ*. Obtaining actual A_{Cs} values by using this option is possible if the average depth of radionuclide migration in the soil (Z) is about 3–4 g/cm². Such a relatively shallow bedding of the radiation source in the soil can currently be found only in forests and virgin meadows. On cultivated lands, with a significant deepening of the radionuclide and an increase in the Z value, the device MKS AT6101D underestimates (up to the factor of 3.5) the actual A_{Cs} . To correct the A_{Cs} value obtained using the MKS AT6101D instrument, a procedure based on the use of the Z value was proposed. The procedure has been successfully tested in the kitchen garden plots located in the zone of radioactive contamination after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. However, at present (without metrological certification), the use of the A_{Cs} determination option of the MKS AT6101D instrument can only be recommended for a preliminary operational assessment of the radioactive contamination of territory.

Authors' personal contribution

V.P. Ramzaev – conceptualization, measurements, writing draft of the manuscript.

A.N. Barkovsky – conceptualization, editing the manuscript.

Acknowledgements

The authors thank K.V. Varfolomeeva and A.A. Bratilova (Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev) for help in the filed measurements.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The work was partially financed under contract No. 0173100001419000019 with Rospotrebnadzor.

References

- ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements. Gamma-Ray Spectrometry in the Environment. ICRU report: 53. 1994. Bethesda, Maryland, USA.
- 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(3): 195–212.
- Varley A, Tyler A, Dowdall M, Bondar Y, Zabrotski 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.
- 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.
- Tyler A. High accuracy *in situ* radiometric mapping. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004;72(1–2): 195–202.
- 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.
- Mikami S, Ishikawa D, Matsuda H, Hoshide Y, Okuda N, Sakamoto R, et al. Guidance for *in situ* gamma spectrometry intercomparison based on the information obtained through five intercomparisons during the Fukushima mapping project. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;210: 105938.
352. Electronic report. NKS Secretariat, Roskilde, Denmark. November, 2015.
- Kroupa T., Setnička M., Čtvrtečková A., Marek R. Reference surface for *in situ* gamma spectrometry // *Radiation Protection Dosimetry*. 2019. Vol. 186, No. 2–3. P. 263–267.
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Валидация метода определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах с использованием портативного спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д *in situ* // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 2. С. 56–65.
- Спектрометры МКС-АТ6101. Приложение к свидетельству № 56473 об утверждении типа средств измерений. URL: <https://www.ntcexpert.ru/documents/docs/opisanie-tipa.pdf>. (Дата обращения: 07.07.2023).
- Жуковский А.И., Кутень С.А., Хрущинский А.А., и др. Оценка области влияния загрязненного участка почвы при решении задач радиационного мониторинга методом «*in situ*» // *Приборы и методы измерений*. 2014. № 1. С. 119–125.
- Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Венков В.А., и др. Опыт реабилитации объектов, загрязненных радионуклидами, на примере участка территории завода «Мосрентген» // *Радиационная гигиена*. 2018. Т. 11, № 3. С. 107–114.
- Екидин А.А., Васильев А.В., Васянович М.Е., и др. Полевые методы исследования радиационной обстановки в районе размещения Белорусской АЭС в предэксплуатационный период // *АНРИ*. 2020. № 2. С. 31–44.
- Yarmoshenko I., Vasilyev A., Ekinin A., et al. Non-destructive measurements of natural radionuclides in building materials for radon entry rate assessment // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. Vol. 328, No. 2. P. 727–737.
- Собакин П.И., Чевычелов А.П., Горохов А.Н. Радиогеохимия почв и песков территории моноценовой россыпи в Южной Якутии // *Почвоведение*. 2021. № 12. С. 1549–1563.
- Råäf C., Jönsson M., Bernhardsson C. Revisiting external dose rate and ground deposition of Chernobyl fallout in the Gävle region in Sweden: Comparison between estimates from soil sampling vs assessments using a field portable (NaI(Tl)) gamma spectrometer. In: XIX conference of the Nordic Society for Radiation Protection, held at Malmö Live, Malmö, Sweden, June 5–9, 2023. URL: https://nsfs.org/wp-content/uploads/2023/05/NSFS-XIX-Programme_Final_2023.pdf. (Дата обращения: 11.07.2023).
- 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.
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Мощность AMBIENTного эквивалента дозы и плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах в населенных пунктах Брянской области России в 2020–2021 гг. // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 4. С. 85–95.
- 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.
- 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.
- 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.

Поступила: 18.09.2023 г.

8. 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.
9. IAEA – International Atomic Energy Agency. Certified Reference Materials for Radioactivity Measurements in Environmental Samples of Soil and Water. Available on: <https://www.iaea.org/publications/8595/certified-reference-materials-for-radioactivity-measurements-in-environmental-samples-of-soil-and-water>. (Accessed 18.06.2023).
10. IAEA – International Atomic Energy Agency. Certified reference material IAEA-385: natural and artificial radionuclides in sediment from the Irish Sea. Available on: https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Shared%20Documents/ReferenceMaterials/Radionuclides/IAEA-385/RS_IAEA-385_V5.3.pdf. (Accessed 18.06.2023).
11. Miller KM, Shebell P, Monetti MA, Klemic G, Venkataraman R, Fisher E, et al. An intercomparison of *in situ* gamma-ray spectrometers. *Radioactivity and Radiochemistry*. 1998;9(4): 27–40.
12. Dowdall M, Bondar Yu, Fristrup P, Guðnason K, Granström M, Hedman A, et al. In-situ Gamma Spectrometry Field Activity – Chernobyl (GAMFAC). NKS-352. Electronic report. NKS Secretariat, Roskilde, Denmark. November, 2015.
13. Kroupa T, Setnička M, Čtvrtečková A, Marek R. Reference surface for *in situ* gamma spectrometry. *Radiation Protection Dosimetry*. 2019;186(2–3): 263–267.
14. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. 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;14(2): 56–65. (In Russian).
15. Spectrometers MKS-AT6101. Appendix to certificate No. 56473 on approval of the type of measuring instruments. Available on: <https://www.ntcexpert.ru/documents/docs/opisanie-tipa.pdf>. (In Russian). (Accessed 07.07.2023)
16. Zhukouski A, Kutsen S, Khrtuchinsky A, Tolkachev A, Guzov V, Kojemiakin V, et al. Impact range estimation of polluted soil area for radiation monitoring by «*in situ*» method. *Pribory i metody izmereniy = Devices and Methods of Measurements*. 2014;(1): 119–125. (In Russian).
17. Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Venkov VA, Ivanov SA, Berezhnoy VV. Experience of remediation of sites contaminated with radionuclides on the example of the territory of the Mosrentgen plant. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(3): 107–114. (In Russian).
18. Ekidin A, Vasiliev A, Vasyanovich M, Nazarov E, Pyshkina M, Nichiporchuk A, et al. Field methods for studying the radiation situation in the area of the Belarusian NPP in the pre-operational period. *ANRI*. 2020;(2): 31–44. (In Russian).
19. Yarmoshenko I, Vasilyev A, Ekidin A, Pyshkina M, Malinovsky G, Onishchenko A, et al. Non-destructive measurements of natural radionuclides in building materials for radon entry rate assessment. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021;328(2): 727–737.
20. Sobakin PI, Chevychelov AP, Gorokhov AN. Radiogeochemistry of soils and sands of the monazite placer in South Yakutia. *Pochvovedenie = Soil Science*. 2021;(12): 1549–1563. (In Russian).
21. Rääf C, Jönsson M, Bernhardsson C. Revisiting external dose rate and ground deposition of Chernobyl fallout in the Gävle region in Sweden: Comparison between estimates from soil sampling vs assessments using a field portable (NaI(Tl)) gamma spectrometer. In: XIX conference of the Nordic Society for Radiation Protection, held at Malmö Live, Malmö, Sweden, June 5–9, 2023. Available on: https://nsfs.org/wp-content/uploads/2023/05/NSFS-XIX-Programme_Final_2023.pdf. (Accessed: 11.07.2023).
22. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Correlation between calculated and measured values of gamma dose rate in air in forests contaminated with ¹³⁷Cs: the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 37–46. (In Russian).
23. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Ambient dose equivalent rate and soil contamination density with ¹³⁷Cs in kitchen gardens in settlements of the Bryansk region, Russia in 2020–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 85–95. (In Russian).
24. Ramzaev V, Bernhardsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M. *In situ* determination of ¹³⁷Cs inventory in soil using a field-portable scintillation gamma spectrometer-dosimeter. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;231: 106562.
25. 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.
26. Orlov MY, Snykov VP, Bochkov LP. Determination of average ground ¹³⁷Cs contamination. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 1994;76(3): 212–217. (In Russian).

Received: 18 September, 2023

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 Wellbeing (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 Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

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

For citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. Experience of using the portable gamma spectrometer MKS AT6101D for *in situ* measurements of the density of ¹³⁷Cs soil contamination in the Bryansk region of Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 86-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-86-96

Для цитирования: Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Опыт применения портативного гамма-спектрометра МКС АТ6101Д для измерения *in situ* плотности загрязнения почвы цезием-137 в Брянской области России // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 86-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-86-96