

Разин К.А., Варфоломеева К.В., Седнев К.А., Репин В.С., Зеленцова С.А.

В ходе проведения экспедиционных радиационно-гигиенических исследований территорий часто возникает необходимость оценки удельной активности радионуклидов в почве на глубинах более 20 см, что сопряжено с определёнными методическими и техническими трудностями при отборе проб. Целью настоящей работы являлось проведение серии градуировочных измерений и оценка возможностей коллимированного сцинтилляционного детектора для количественного определения удельной активности ^{137}Cs в грунте на различных глубинах в скважинах *in situ*. Материалы и методы: Для гамма-спектрометра МКСП-01 «РАДЭК» с кристаллом $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ была проведена комплексная градуировка, включающая исследование осевой чувствительности и эффективности регистрации радионуклида ^{137}Cs как от точечного источника, так и от объемного источника почвы с известной активностью. Это позволило определить оптимальные параметры измерений, включая расстояния между коллиматорами, и градуировочные коэффициенты для точного определения удельной активности в различных расстояниях и с разным объемом образца. Результаты исследования и обсуждение: В данной статье представлены результаты градуировки детектора на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 30 \times 30$ мм, предназначенного для измерения интенсивности гамма-излучения ^{137}Cs в скважинах на глубинах до 1 м. Проведённые градуировочные измерения показали, что конструкция детектора позволяет измерять удельные активности ^{137}Cs от 200 Бк/кг в скважинах диаметром 90 мм с эффективностью регистрации пика ^{137}Cs около 0,1 % и временем измерения 30 мин. Детектор обеспечивает надежное обнаружение слоёв почвы с удельной активностью выше минимально значимой удельной активности. Заключение: Коллиматоры, обеспечивающие доступ гамма-излучения к открытой части кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, позволяют регулировать толщину исследуемого слоя почвы (ширину обзора горизонта) в процессе измерения. При расстоянии между коллиматорами 1,5 см детектор позволяет изучать горизонты удельной активности почвы с шагом 5 см, при увеличении расстояния до 2 см – с шагом 10 см.

Введение

Наряду с полевой спектрометрией, для точной количественной характеристики радиоактивного загрязнения существует метод отбора проб почвы, позволяющий в лабораторных условиях определять содержание в почве альфа-, бета- и гамма-излучающих радионуклидов [10]. Следует, однако, отметить, что отбор проб почвы, при всех его достоинствах, сопряжен с трудностями на глубинах более 20 см, поэтому имеется целый класс приборов и методов проведения спектрометрических исследований в скважинах [11].

Публикации по методам исследования содержания техногенных радионуклидов в скважинах встречаются редко, поскольку в большинстве случаев техногенные радионуклиды, как правило, расположены в верхних горизонтах почвы в слое до 20 см. В литературе приводится случай применения метода глубинного зондирования ^{137}Cs на территории, прилегающей к месту проведения мирного ядерного взрыва Глобус-1 (Ивановская область), проведенного с внештатным аварийным выбросом радионуклидов на поверхность. В процессе обустройства инженерных барьеров значительная часть аварийно-загрязненной почвы была погребена в толстом слое грунта, поэтому для радиационно-гигиенической оценки потенциальной опасности важно было.

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Repin@mail.ru

во-первых, определить наличие техногенных радионуклидов на глубинах более 20 см [7], а во-вторых, оценить наличие почвы с уровнями загрязнения ^{137}Cs на уровне и выше минимально-значимой удельной активности (МЗУА) в соответствии с критериями НРБ-99/2009¹.

В этом исследовании был использован детектор на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ с размером кристалла $\varnothing 30 \times 30$ мм, размещенный в штанге длиной 73,5 см. Спектрометр и программное обеспечение к нему был изготовлен по заказу ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в рамках выполнения работ по контракту с ФМБА № 81.005.14.2 от 17 февраля 2014 г. по программе «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года». Предварительные качественные результаты цитируемых работ показали, что для точной оценки удельной активности почвы на разных глубинах необходимо учитывать диаметр скважины, расстояние между коллиматорами, влияние на результат измерений активности в слоях почвы, расположенных выше и ниже измеряемого. Таким образом, для корректного практического применения данного прибора требуется проведение градуировочных измерений.

Цель исследования – проведение градуировочных измерений скважинного гамма-детектора на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ для оценки удельной активности ^{137}Cs на различных глубинах.

Материалы и методы

Градуировка была выполнена для гамма-спектрометра марки МКСП-01 «РАДЭК» (Россия), оснащенного детектором с кристаллом $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ (рис. 1). Образец детектора был изготовлен в Научно-техническом центре «РАДЭК» по заказу ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева для лаборатории экологии и оснащен мобильным программным обеспечением ASpectrum.

Выбор детектора на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ связан с тем, что данный тип детектора имеет более высокое разрешение для фотопика ^{137}Cs по сравнению с кристаллом $\text{NaI}(\text{TI})$,

что, в свою очередь, позволяет легко отделить пик ^{137}Cs от пиков природных радионуклидов, в частности, ^{214}Bi и ^{208}Tl .

Оценка и вычитание собственного фона детектора на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ выполнена посредством измерений счета детектора в толстостенной (15 см) стальной защите.

Программа градуировки включала, прежде всего, определение точного местоположения центра кристалла для последующей более точной установки коллиматоров детектора относительно данного центра. На втором этапе исследовалась зависимость скорости счета детектора от местоположения точечного источника, расположенного на различных расстояниях от оси детектора при различных расстояниях между коллиматорами. На третьем этапе исследовалась зависимость эффективности регистрации ^{137}Cs в слое почвы с известной удельной активностью в зависимости от диаметра окружающего детектор слоя. Выполнение первых двух задач позволяло выяснить, как расстояние между коллиматорами влияет на телесный угол обзора детектора, то есть эффективную толщину измеряемого слоя почвы.

Центр кристалла определялся с помощью точечного источника ^{137}Cs из набора образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ) с активностью около 40 кБк. Точечный источник помещался в свинцовый цилиндр, благодаря чему создавался направленный пучок излучения в сторону детектора. Для отсчета смещения вдоль оси детектора использовалась линейка, начало которой совмещалось с концом штанги диаметром 4 см. Перемещение точечного источника выполнялось с шагом 0,5 см.

Исследование осевой чувствительности детектора, средняя часть которого располагалась между цилиндрическими свинцовыми коллиматорами с внутренним диаметром 4 см и наружным диаметром 8 см, проводилось также с помощью точечного источника, перемещаемого на различных расстояниях вдоль оси штанги (рис. 1). Шаг смещения источника вдоль оси составлял 1 см, а перпендикулярно оси – 5 см (начальное расстояние точечного источника от оси детектора составляло примерно 5 см).

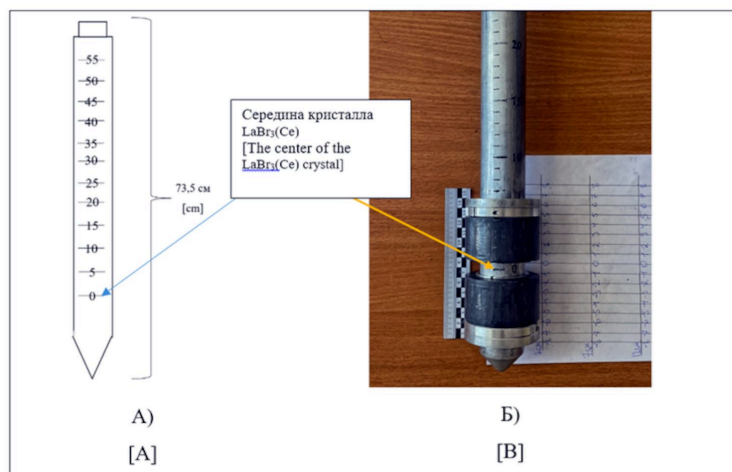


Рис. 1. Схематическое изображение штанги скважинного гамма-спектрометра МКСП-01 «РАДЭК» (А) и схема исследования чувствительности коллимированного детектора на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ к излучению на различных расстояниях точечного источника ^{137}Cs (Б)

[Fig. 1. Schematic representation of the borehole gamma-spectrometer rod MKSP-01 “RADEK” (A) and the scheme for the study of the sensitivity of the collimated $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ detector to radiation from a ^{137}Cs point source at various distances (B)]

¹ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 No 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный No 14534). [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPIN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 14.08.2009, registration No. 14534). (In Russ.)].

Исследование чувствительности детектора к ^{137}Cs в объемном источнике почвы высотой 10 см (рис. 2) проводилось посредством размещения детектора с коллиматорами в середине пустой цилиндрической перегородки диаметром 9 см, за пределами которой располагались на расстояниях

между стенками 5 см три дополнительные перегородки, между которыми насыпался слой почвы шириной 5 см, высотой 10 см и удельной активностью $6\,540 \pm 460$ Бк/кг. Результаты гамма-спектрометрии данной почвы, отобранной на загрязненной территории, представлены в таблице 1.

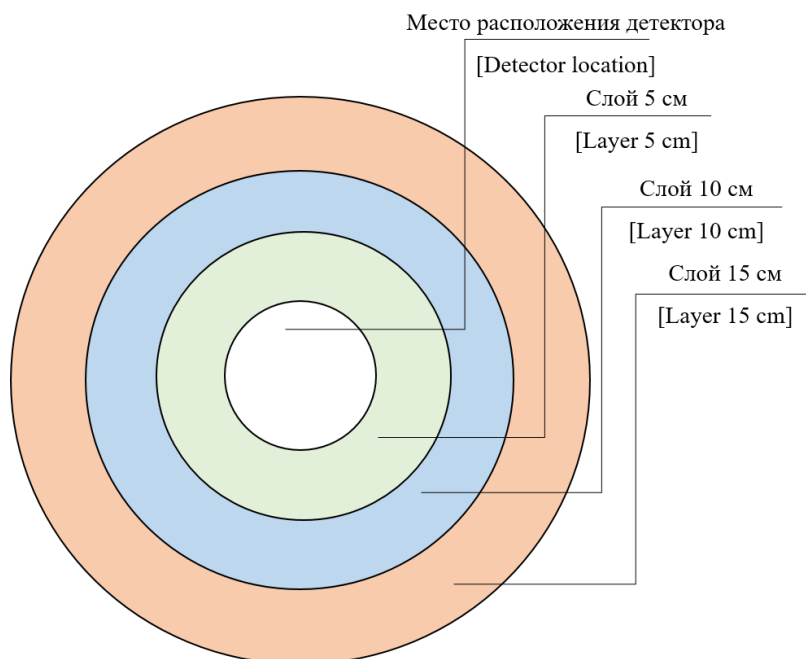


Рис. 2. Схема исследования чувствительности коллимированного детектора к объемному источнику ^{137}Cs
[Fig. 2. Scheme of the study of the collimated detector sensitivity to a volumetric source of ^{137}Cs]

Результаты гамма-спектрометрии пробы почвы, используемой для градуировки скважинного детектора

Таблица 1

[Table 1

Results of gamma spectrometry of the soil sample used for calibration of the borehole detector]

Время измерения, с [Time measurement, s]	Объем, мл [Volume, ml]	Масса, г [Mass, g]	Удельная активность, Бк/кг [Activity concentration, Bq/kg]			
			^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th
1784	1000	796	6540 ± 460	520 ± 55	34 ± 7	42 ± 5

Измерения эффективности регистрации – соотношения скорости счета и удельной активности ^{137}Cs – в зависимости от радиуса окружающего слоя почвы проводилось путем последовательного заполнения пространства между цилиндрами, что позволяло определить эффективный радиус слоя, после которого эффективность мало зависит от его увеличения.

Скорость счета ^{137}Cs (^{137m}Ba) для всех выполненных измерений определялась по площади фотопика с энергией 662 кэВ (за вычетом площади пьедестала).

Статистическая обработка результатов измерений и графические построения выполнялись средствами MS Excel.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений, выполненных с целью определения точного местоположения середины кристалла

по максимуму кривой зависимости скорости счета ^{137}Cs (^{137m}Ba) под фотопиком от положения направленного источника излучения, перемещаемого параллельно оси детектора, представлены в таблице 2.

Из представленных в таблице 2 результатов видно, что середина кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ находится на отметке 7,5 см от конца штанги, что позволяет проводить точную установку коллиматоров. Данная отметка в дальнейших исследованиях принималась за нулевую точку отсчета.

Исследования чувствительности коллимированного детектора к излучению точечного источника (рис. 1) проводились для ширины неколлимированной части детектора 2 и 1,5 см. Источник цезия перемещался вдоль оси от центральной части кристалла к периферии. Результаты измерений представлены в таблице 3 и на рисунках 3 и 4 соответственно.

Таблица 2

Скорость счета детектора при различных положениях точечного источника вдоль оси штанги детектора

[Table 2]

Count rate of the detector as a function of the axial position of a point source along the detector rod]

Расстояние по оси от конца штанги, см [Axial distance from the end of the rod, cm]	Скорость счета, имп/с [Count rate, cps]	Расстояние по оси от конца штанги, см [Axial distance from the end of the rod, cm]	Скорость счета, имп/с [Count rate, cps]
0–9 см [cm]		9,5–18 см [cm]	
0	1,30 ± 0,04	9,5	14,7 ± 0,3
0,5	1,40 ± 0,04	10	11,2 ± 0,3
1	1,20 ± 0,04	10,5	7,10 ± 0,21
1,5	1,30 ± 0,05	11	3,60 ± 0,14
2	1,2 ± 0,10	11,5	1,90 ± 0,10
2,5	1,4 ± 0,11	12	1,00 ± 0,10
3	2,00 ± 0,11	12,5	1,00 ± 0,10
3,5	2,40 ± 0,12	13	1,20 ± 0,10
4	3,00 ± 0,14	13,5	1,30 ± 0,05
4,5	4,80 ± 0,18	14	1,30 ± 0,05
5	6,90 ± 0,21	14,5	1,30 ± 0,04
5,5	11,4 ± 0,27	15	1,50 ± 0,04
6	14,8 ± 0,32	15,5	1,40 ± 0,05
6,5	17,6 ± 0,3	16	1,50 ± 0,05
7	20,1 ± 0,4	16,5	1,5 ± 0,1
7,5	19,8 ± 0,4	17	1,4 ± 0,1
8	19,7 ± 0,4	17,5	1,40 ± 0,05
8,5	18,8 ± 0,4	18	1,30 ± 0,05
9	17,3 ± 0,3	–	

Таблица 3

Скорость счета коллимированного детектора вдоль его оси при изменении ширины неколлимированной части при различных положениях точечного источника (ширина неколлимированной части $b_1=2$ см, ширина неколлимированной части $b_2=1,5$ см)

[Table 3]

The count rate of the collimated detector along its axis with change in the width of the non-collimated part at different positions of a point source (the width of the non-collimated part b_1 is 2 cm, width of the non-collimated part b_2 is 1.5 cm)]

Расстояние*, см [Distance*, cm]	Расстояние от края коллиматора (перпендикулярно оси) [Distance from the edge of the collimator (perpendicular to the axis)]							
	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2
	2 см [cm]	2 см [cm]	7 см [cm]	7 см [cm]	12 см [cm]	12 см [cm]	17 см [cm]	17 см [cm]
	имп/с [cps]							
-8	0,63 ± 0,03	2,44 ± 0,07	4,45 ± 0,14	1,39 ± 0,08	5,72 ± 0,20	1,91 ± 0,07	4,33 ± 0,01	1,90 ± 0,05
-7	1,07 ± 0,05	1,76 ± 0,07	7,69 ± 0,17	2,08 ± 0,07	7,09 ± 0,20	2,68 ± 0,10	4,90 ± 0,21	2,41 ± 0,07
-6	1,80 ± 0,11	1,63 ± 0,06	12,3 ± 0,4	2,85 ± 0,09	8,03 ± 0,20	3,55 ± 0,08	4,90 ± 0,23	2,76 ± 0,07
-5	4,50 ± 0,20	2,73 ± 0,08	16,7 ± 0,4	4,53 ± 0,13	8,62 ± 0,20	4,85 ± 0,20	4,89 ± 0,26	3,23 ± 0,07
-4	15,6 ± 0,7	5,24 ± 0,12	19,7 ± 0,5	7,55 ± 0,25	9,71 ± 0,30	5,83 ± 0,13	5,04 ± 0,18	3,65 ± 0,12
-3	66,2 ± 1,6	9,71 ± 0,30	22,6 ± 0,5	12,2 ± 0,4	9,84 ± 0,30	7,18 ± 0,20	5,54 ± 0,20	4,06 ± 0,10
-2	93,4 ± 1,50	20,7 ± 0,4	24,2 ± 0,4	17,2 ± 0,5	10,2 ± 0,3	7,92 ± 0,20	5,47 ± 0,23	4,69 ± 0,12
-1	112,0 ± 1,7	71,5 ± 1,5	24,6 ± 0,6	21,4 ± 0,4	10,4 ± 0,3	8,89 ± 0,3	5,63 ± 0,25	4,69 ± 0,11
0	114 ± 2,0	91,6 ± 1,3	25,3 ± 0,5	23,1 ± 0,6	10,0 ± 0,3	9,68 ± 0,20	5,56 ± 0,20	5,04 ± 0,11
1	96,4 ± 1,3	87,3 ± 1,2	24, ± 0,3	23,3 ± 0,7	10,2 ± 0,3	9,75 ± 0,18	5,52 ± 0,16	5,15 ± 0,14

Расстояние*, см [Distance*, cm]	Расстояние от края коллиматора (перпендикулярно оси) [Distance from the edge of the collimator (perpendicular to the axis)]							
	b ₁ 2 см [cm]	b ₂ 2 см [cm]	b ₁ 7 см [cm]	b ₂ 7 см [cm]	b ₁ 12 см [cm]	b ₂ 12 см [cm]	b ₁ 17 см [cm]	b ₂ 17 см [cm]
	имп/с [cps]							
2	81,9 ± 1,4	20,7 ± 0,5	23,1 ± 0,6	20,8 ± 0,3	9,91 ± 0,20	9,64 ± 0,20	5,48 ± 0,18	5,19 ± 0,14
3	41,5 ± 1,0	12,2 ± 0,2	21,4 ± 0,4	15,3 ± 0,3	9,63 ± 0,30	8,54 ± 0,25	5,18 ± 0,16	4,92 ± 0,14
4	7,46 ± 0,30	5,37 ± 0,16	19,6 ± 0,5	10,8 ± 0,2	9,24 ± 0,30	7,27 ± 0,22	5,06 ± 0,17	4,33 ± 0,18
5	1,73 ± 0,10	2,45 ± 0,08	15,7 ± 0,5	6,14 ± 0,15	8,88 ± 0,23	5,91 ± 0,17	5,25 ± 0,15	4,02 ± 0,14
6	0,57 ± 0,05	1,07 ± 0,03	11,1 ± 0,4	3,71 ± 0,11	8,05 ± 0,23	5,22 ± 0,20	4,72 ± 0,16	3,46 ± 0,14
7	0,29 ± 0,03	0,54 ± 0,03	7,22 ± 0,25	2,36 ± 0,08	7,20 ± 0,17	4,00 ± 0,15	4,64 ± 0,16	2,97 ± 0,12
8	0,18 ± 0,02	0,50 ± 0,02	4,2 ± 0,2	1,28 ± 0,05	6,01 ± 0,12	2,81 ± 0,09	4,37 ± 0,17	2,66 ± 0,10

* Расстояние от центра кристалла вдоль оси, см [* Radial distance from the center of the crystal along the axis, cm]

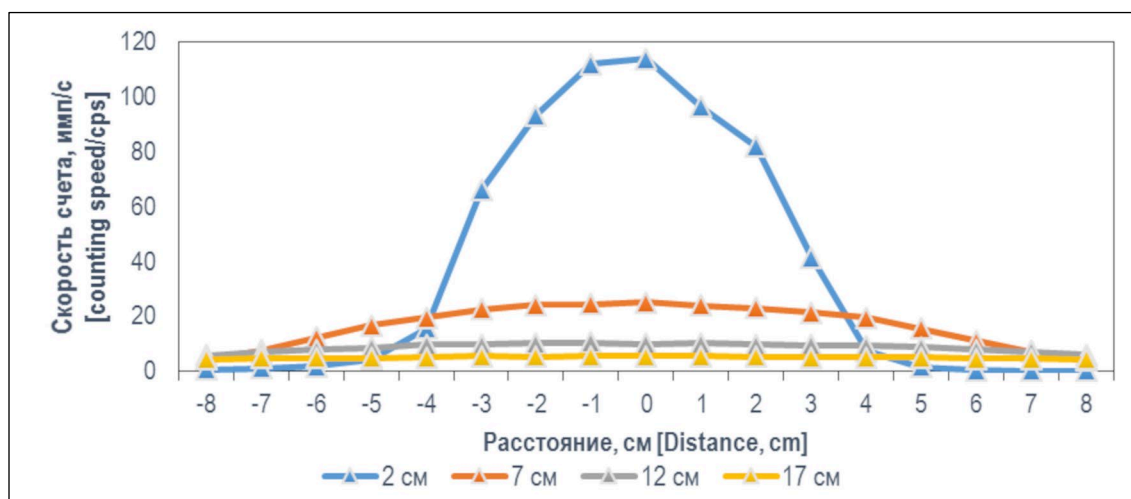


Рис. 3. Зависимость скорости счета коллимированного (ширина 2 см) детектора от расстояния точечного источника от оси и центра кристалла - (b₁)

[Fig. 3. Dependence of the count rate of the collimated (width 2 cm) detector on the distance of a point source from the axis and the center of the crystal - (b₁)]

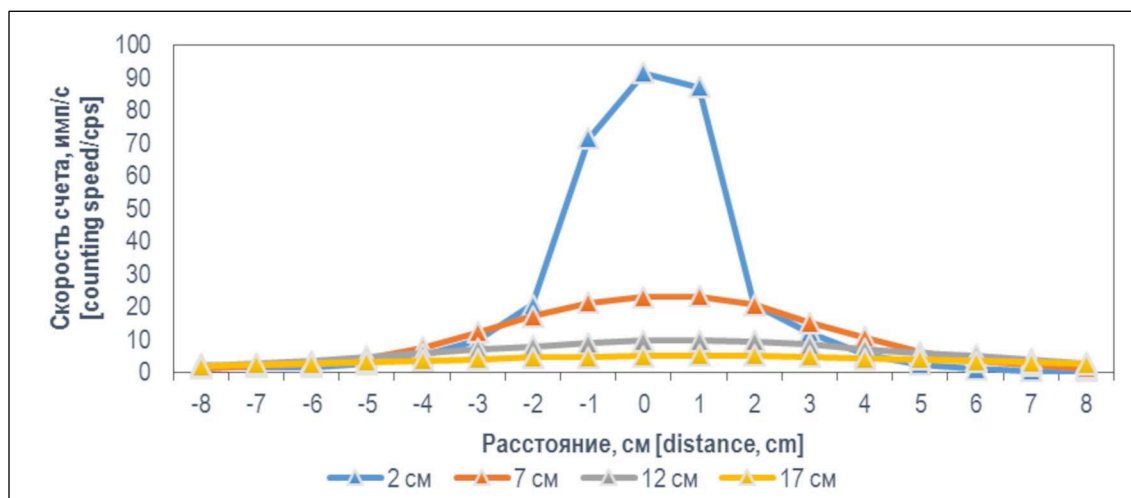


Рис. 4. Зависимость скорости счета коллимированного (ширина 1,5 см) детектора от расстояния точечного источника от оси и центра кристалла - (b₂)

[Fig. 4. Dependence of the count rate of a collimated (width 1.5 cm) detector on the distance of a point source from the axis and the center of the crystal - (b₂)]

Из сопоставления результатов измерений, представленных на рисунках 3 и 4, видно, что при ширине неколлимированной части кристалла детектора 1,5 см телесный угол открытой части детектора охватывает с максимальной эффективностью 5-ти сантиметровую зону обзора при минимальном удалении точечного источника от оси детектора, тогда как при ширине неколлимированной части 2 см ширина зоны обзора увеличивается до 10 см, но эффективность регистрации импульсов становится выше.

Оценка эффективности регистрации коллимированного детектора в объемном источнике ^{137}Cs толщиной 5 см проводилась для радиусов засыпки, соответствующих слоям 5, 10 и 15 см (рис. 2). Для каждого варианта засыпки проводились троекратные измерения. Результаты измерений представлены в таблице 4.

Из таблицы 4 видно, что прирост скорости счета для диаметра окружающего слоя почвы 15 см составляет около 10 % от скорости счета для слоя толщиной 10 см, т. е. при удельной активности почвы 6540 Бк/кг скорость счета 5,2 имп/с близка к максимальной. Эффективность регистрации, рассчитанная по соотношению площади пика ^{137}Cs и удельной активности, составляет 0,0008 (имп/с)/(Бк/кг).

Расчет минимально детектируемой удельной активности (МДУА) выполнен с учетом площади пьедестала под пиком цезия, обусловленного комптоновским рассеянием гамма-излучения природных радионуклидов с энергиями выше 660 кэВ. Результаты гамма-спектрометрии почвы, представленные в таблице 1, показывают наличие в спектре природных радионуклидов, которые дают дополнительный вклад к фоновой составляющей под пиком ^{137}Cs (рис. 5).

Таблица 4

Результаты измерений скорости счета коллимированного детектора в зависимости от диаметра объемного источника ^{137}Cs , окружающего детектор, имп/с

[Table 4]

Results of measurements of the count rate of the collimated detector as a function of the layer diameter of a volumetric ^{137}Cs source surrounding the detector, cps]

№ измерения [Measure-ment No.]	Слой 5 см [Layer 5 cm]	Слой 10 см [Layer 10 cm]	Слой 15 см [Layer 15 cm]
1	3,26 ± 0,09	5,26 ± 0,10	5,14 ± 0,10
2	2,77 ± 0,08	4,08 ± 0,10	4,97 ± 0,10
3	2,77 ± 0,08	4,40 ± 0,10	5,52 ± 0,10
Среднее арифметическое (Ст. откл.) [Mean (Std.Dev.)]	2,93 (0,28)	4,58 (0,61)	5,21 (0,28)

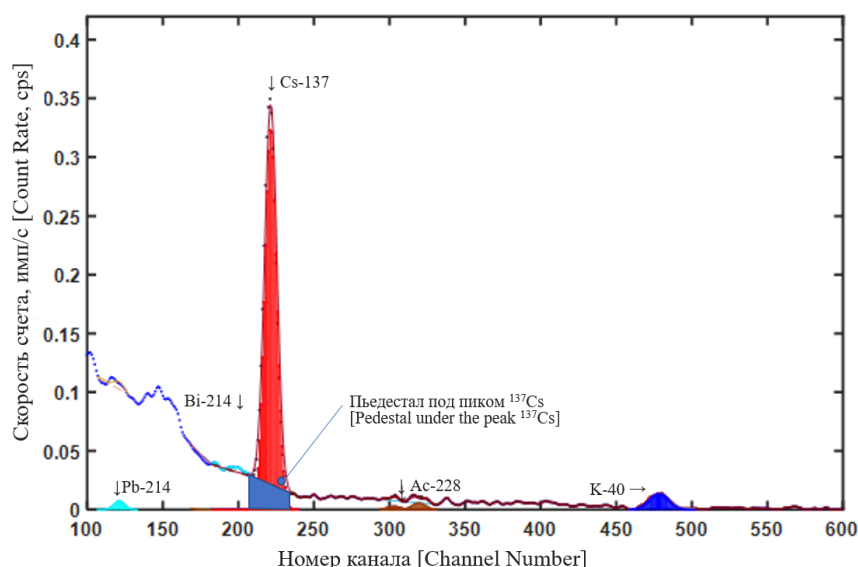


Рис. 5. Гамма-спектр слоя почвы диаметром 15 см, полученный с детектором на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ в геометрии измерений, показанной на рисунке 2

[Fig. 5. Gamma-spectrum of the 15 cm diameter soil layer obtained with $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ detector in the measurement geometry shown in Figure 2]

Для расчета МДУА использована следующая формула:

$$\text{МДУА} = 4,65 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta S}{t_{\text{изм}}}} \cdot \frac{1}{\varepsilon}, \text{ Бк/кг}$$

где ΔS – площадь пьедестала, имп/с;

$t_{\text{изм}}$ – время измерений, с;

ε – коэффициент, определяющий соотношение между скоростью счета ^{137}Cs (^{137m}Ba) и удельной активностью, (имп/с)/(Бк/кг).

Результаты расчета показывают, что площадь пьедестала равна 0,00048 имп/с, поэтому при коэффициенте ε , равном 0,0008, и времени измерений 1800 с, МДУА составляет 179 Бк/кг. Округленное значение составляет 200 Бк/кг.

Заключение

Результаты градуировки детектора на основе кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $\varnothing 30 \times 30$ мм показали, что конструкция данного детектора при расстоянии между коллиматорами 1,5 см позволяет измерять удельные активности ^{137}Cs от 200 Бк/кг в скважинах диаметром 9 см при времени измерений 30 мин.

Коллиматоры, обеспечивающие доступ излучения к открытой части кристалла $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, позволяют регулировать ширину обзора горизонта почвы. При расстоянии между коллиматорами 1,5 см детектор позволяет изучать горизонты удельной активности почвы с шагом 5 см, а при расстоянии 2 см – с шагом 10 см.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Разин К.А. провел градуировочные измерения скважинного гамма-детектора, провел статистическую обработку данных, подготовил таблицы и рисунки.

Варфоломеева К.В. провела поиск и анализ литературных данных, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Седнев К.А. провел поиск и анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Репин В.С. является ответственным исполнителем НИР, разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, написал черновик рукописи и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Зеленцова С.А. провела поиск и анализ литературных данных, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам за их ценные, конструктивные замечания и полезные предложения, которые способствовали улучшению качества данной работы.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения отраслевой НИР «Совершенствование и развитие методов мониторинга объектов окружающей среды в районах проведения мирных ядерных взрывов. Радиационно-гигиеническая характеристика источников питьевого водоснабжения».

Литература

- Верутин М.Г., Кобрусева О.Н. Ядерно-геофизические методы исследований: лабораторные и полевые радиометрические методы: практическое руководство. Гомель: Гомельский ГУ им. Ф. Скорин, 2021. 44 с.
- Обзор отечественных радиометрических и спектрометрических систем, которые могут быть использованы для целей учета и контроля ядерных материалов // ВНИИА. URL: <https://vniia.ru/rgamo/literat/obzor/doc/obzorrus.pdf> (Дата обращения: 30.06.2025).
- Иванов М.М., Иванова Н.Н. Экспресс-анализ вертикального распределения ^{137}Cs в почве для оценки темпов эрозивно-аккумулятивных процессов в зоне интенсивного радиоактивного загрязнения // Почвоведение. 2023. № 4. С. 510–520. DOI: 10.31857/S0032180X22601104.
- Пак Д.Ю., Пак Ю.Н., Есендосова А.Н., Смагулова А.Б. О возможности спектрометрического гамма-каротажа при решении задач нефтегазопромысловой геофизики // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. Технические науки. 2016. № 4. С. 1069–1072.
- Иванов М.М., Комиссарова О.Л., Кошовский Т.С., Цыпленков А.С. Применение полевой гамма-спектрометрии и дозиметрии для исследования осадконакопления на пойме малой равнинной реки в зоне радиоактивного загрязнения // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2021. № 1. С. 120–127.
- Пак Д.Ю., Пак Ю.Н., Табаева А.Ю. Перспективы геофизических исследований скважин на основе спектрометрического гамма-каротажа // Труды университета. 2022. Т. 86, № 1. С. 81–89.
- Храмцов Е.В. Радиационная обстановка на территории проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» до выполнения реабилитационных работ // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, №2. С. 81–88. DOI:10.21514/1998-426x-2019-12-2-81-88.
- Цветнова О.Б., Александров М.Н., Щеглов А.И. Современная радиоэкологическая обстановка на территории объекта «Глобус - 1» // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2013. № 2. С. 11–16.
- Варфоломеева К.В., Седнев К.А., Библин А.М. и др. Радиационно-гигиеническая характеристика и санитарное состояние территории проведения мирных ядерных взрывов «Глобус-3» и «Кварц-2» в Республике Коми // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, №1. С. 100–111. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-100-111.
- Казачёнок Н.Н. «Закономерности формирования техногенных биогеохимических провинций радиоактивных изотопов». Докторская диссертационная работа по специальности геоэкология. Науки о Земле. СПб, 2018. 313 с.
- Учебно-методическое пособие по радиоактивным, акустическим и термическим методам исследования скважин / Федеральное агентство по образованию, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования, Уфимский государственный нефтяной технический университет. Уфа, 2009. 101 с.
- Языков В.Г., Легавко А.В. Особенности проведения геофизических исследований в скважинах при изучении и освоении инфильтрационных (гидрогенных) месторождений урана. Томск: Издательство ТПУ, 2012. С. 12.
- Баретто П.М. Новейшие достижения в разведке урановых месторождений // Бюллетень МАГАТЭ. Т. 23, №2. С. 18–24. URL: <https://clck.ru/3NPvCr> (Дата обращения: 30.06.2025).
- Гейхман М.Г., Колесниченко В.П., Климов В.В. и др. Новые технические средства, технологии и методология геолого-геофизического контроля технического состояния крепи газовых и газоконденсатных скважин, в том числе и скважин с аномально высокими пластовыми давлениями и температурой. Краснодар: Просвещение-Юг, 2011. 265 с.
- Семенов В.Н. Контроль за разработкой нефтяных и газовых месторождений промыслово-геофизическими методами: монография / В.Н. Семенов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Тюменский государственный университет. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2020. 224 с.
- Акиншин А.В., Кантемиров Ю.Д. Практическое руководство по интерпретации геофизических

- исследований скважин: монография. ООО «Тюменский нефтяной научный центр», 2021. 122 с.
17. Уткин В.И. Селективный гамма-гамма каротаж на угольных месторождениях. М.: Наука, 1975. 127 с.
18. Урманов Э.Г. Нейтронный каротаж нефтегазовых скважин: его модификации, обработка и интерпретация результатов: учебно-методическое пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 80 с.

Поступила: 15.07.2025

Разин Кирилл Александрович – исполняющий обязанности младшего научного сотрудника лаборатории экологии 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

Варфоломеева Ксения Владимировна – научный сотрудник лаборатории экологии 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

ORCID: 0009-0008-3483-806X

Седнев Константин Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории экологии 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

ORCID: 0009-0006-7906-1106

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии 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.repin@mail.ru

ORCID: 0009-0005-9897-0930

Зеленцова Светлана Александровна – научный сотрудник лаборатории экологии 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

ORCID: 0009-0005-2244-0028

Для цитирования: Разин К.А., Варфоломеева К.В., Седнев К.А., Репин В.С., Зеленцова С.А. Исследование возможностей детектора на основе кристалла бромида лантана для оценки удельной активности цезия-137 в глубоких слоях почвы // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 3. С. 120–129. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-3-120-129

Study of the capabilities of a detector based on a lanthanum bromide crystal for assessing ^{137}Cs activity concentration in deep soil layers

Kirill A. Razin, Kseniya V. Varfolomeeva, Konstantin A. Sednev, Viktor S. Repin, Svetlana A. Zelentsova

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

During expeditionary radiation-hygienic studies of territories, there is often a need to assess activity concentration of radionuclides in soil at depths greater than 20 cm. This is associated with certain methodological and technical difficulties in sampling. The aim of this study was to carry out a series of calibration measurements and evaluate the capabilities of a collimated scintillation detector for determining ^{137}Cs activity concentration in soil at different depths in boreholes in situ. Materials and Methods: A comprehensive calibration was carried out for the MKSP-01 RADEK gamma spectrometer with a $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ crystal, including a study of the axial sensitivity and detection efficiency for the ^{137}Cs radionuclide from both a point source and a volumetric soil source with known activity. This made it possible to determine the optimal measurement parameters, including the distances between collimators and calibration coefficients for accurate determination of activity concentration at different distances and with different sample volumes. Results and Discussion: This article presents the results of calibration of the detector based on a $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ crystal measuring $\varnothing 30 \times 30$ mm, designed to measure the intensity of ^{137}Cs gamma radiation in boreholes at depths of up to 1 m. The calibration measurements showed that the detector design allows measuring activity concentration of ^{137}Cs from 200 Bq/kg in boreholes with a diameter of 90 mm, with the ^{137}Cs peak detection efficiency of about 0.1% and a measurement time of 30 min. The detector ensures reliable detection of soil layers with ^{137}Cs activity above the minimum significant activity concentration. Conclusion: Collimators providing access of gamma radiation to the open part of the $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ crystal allow adjusting the thickness

Viktor S. Repin

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

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

of the studied soil layer (horizon view width) during the measurement process. With a distance between the collimators of 1.5 cm, the detector allows studying the activity concentration horizons with a step of 5 cm, with an increase in the distance to 2 cm – 10 cm.

Key words: field gamma spectrometry, radionuclide contamination, technogenic radionuclides, ^{137}Cs , activity concentration, soil, spectrometer calibration.

Authors' personal contribution

Razin K.A. conducted the calibration measurements of the well gamma detector, performed statistical data processing, and prepared tables and figures.

Varfolomeeva K.V. conducted the literature search and analysis, and edited the intermediate draft of the manuscript.

Sednev K.A. conducted the literature search and analysis, and edited the intermediate draft of the manuscript.

Repin V.S. is the principal investigator of the research project, developed the study design, defined the objectives and tasks, wrote the manuscript draft, and submitted the final version of the manuscript for journal publication.

Zelentsova S.A. conducted the literature search and analysis, and edited the intermediate draft of the manuscript.

Acknowledgments

The authors sincerely express their gratitude to the reviewers for their valuable, constructive comments and helpful suggestions, which contributed to the improvement of this work.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

This article was prepared as part of the sectoral research project "Improvement and Development of Environmental Monitoring Methods in Areas of Peaceful Nuclear Explosions. Radiation-Hygienic Characterization of Drinking Water Supply Sources".

References

- Verutin MG, Kobruseva ON. Nuclear and geophysical research methods: laboratory and field radiometric methods: a practical guide. Gomel: Gomel State University named after F. Skorina; 2021. 44 p. (In Russian).
- Review of domestic radiometric and spectrometric systems that can be used for accounting and control of nuclear materials. Available from: <https://vniia.ru/rgamo/literat/obzor/doc/obzorus.pdf> [Accessed: 30 Jun 2025]. (In Russian).
- Ivanov MM, Ivanova NN. Express analysis of the vertical distribution of ^{137}Cs in soil to assess the rate of erosion and accumulation processes in the zone of intense radioactive contamination. *Soil science = Pochvovedenie*. 2023.4: 510-520. (In Russian). DOI: 10.31857/S0032180X22601104.
- Pak DY, Pak YuN, Esendosova AN, Smagulova AB. On the possibility of spectrometric gamma logging in solving problems of oil and gas field geophysics. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. Tekhnicheskie nauki = International Journal of Applied and Fundamental Research. Technical Sciences*. 2016.4: 1069-1072. (In Russian).
- Ivanov MM, Komissarova OL, Koshovsky TS, Tsyplenkov AS. Application of field gamma-ray spectrometry and dosimetry to study sedimentation in the floodplain of the small plain river in the zone of radioactive contamination. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya = Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*. 2021.1: 120-127. (In Russian).
- Pak DY, Pak YuN, Tabaeva AY. Prospects of geophysical research of wells based on spectrometric gamma logging. *Trudy universiteta = Proceedings of the University*. 2022.86(1): 81-89. (In Russian).
- Khrantsov E. Radiation situation on the territory of the peaceful nuclear explosion «Globus-1» before performing the rehabilitation works. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019.12(2): 81-88. DOI:10.21514/1998-426x-2019-12-2-81-88. (In Russian).
- Tsvetnova OB, Alexandrov MN, Shcheglov AI. Modern radioecological situation on the territory of the Globus -1 facility. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie = Bulletin of the Moscow University. Series 17. Soil science*. 2013;2: 11-16. (In Russian).
- Varfolomeeva K.V., Sednev K.A., Biblin A.M., Ivanov S.A., Zelentsova S.A., Repin V.S., Georgieva A.G. Radiation-hygienic characteristics and sanitary condition of the territories of the Globus-3 and the Quartz-2 peaceful nuclear explosions in the Komi Republic. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025;18(1):100-111. DOI:10.21514/1998-426X-2025-18-1-100-111. (In Russian).
- Kazachyonok NN, "Patterns of Formation of Technogenic Biogeochemical Provinces of Radioactive Isotopes." Doctoral Dissertation in Geoecology (Earth Sciences). St. Petersburg; 2018. 313 p. (In Russian).
- Educational and Methodological Manual on Radioactive, Acoustic, and Thermal Methods for Well Investigation / Federal Agency for Education, State Educational Institution of Higher Professional Education, Ufa State Petroleum Technological University. Ufa; 2009. 101 p. (In Russian).
- Yazikov VG, Legavko AV. Features of Conducting Geophysical Surveys in Wells during the Study and Development of Infiltration (Hydrogenic) Uranium Deposits. Tomsk: TPU Publishing House; 2012. 12 p. (In Russian).
- Barreto PM. Recent Advances in Uranium Deposit Exploration. *IAEA Bulletin*. 23(2): 18-24.
- Geikhman MG, Kolesnichenko VP, Klimov VV et al. New Technical Means, Technologies, and Methodologies for Geological and Geophysical Monitoring of the Technical Condition of Gas and Gas-Condensate Well Casings, Including Wells with Abnormally High Formation Pressures and Temperatures. Krasnodar: Prosveshchenie-Yug; 2011. 265 p. (In Russian).
- Semenov VN. Monitoring of Oil and Gas Reservoir Development Using Field Geophysical Methods: Monograph / VN. Semenov; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Tyumen State University. Tyumen: Tyumen State University Publishing House; 2020. 224 p. (In Russian).
- Akinshin AV, Kantemirov YuD. Practical Guide to Interpreting Well Geophysical Surveys: Monograph. LLC "Tyumen Oil Scientific Center"; 2021. 122 p. (In Russian).
- Utkin VI. Selective Gamma-Gamma Logging in Coal Deposits. Nauka, Moscow; 1975. 127 p. (In Russian).
- Urmanov EG. Neutron Logging of Oil and Gas Wells: Its Modifications, Processing, and Interpretation of Results: Educational and Methodological Manual. Moscow, Vologda: Infra-Engineering; 2023. 80 p. (In Russian).

Received: July 15, 2025

Kirill A. Razin – Acting Junior Research Fellow of the Ecology Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Kseniya V. Varfolomeeva – Research Fellow of the Ecology Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0008-3483-806X

Konstantin A. Sednev – Junior Research Fellow of the Ecology Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0006-7906-1106

For correspondence: Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Chief Research Fellow, Head of the Ecology Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru)

ORCID: 0009-0005-9897-0930

Svetlana A. Zelentsova – Research Fellow of the Ecology Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0005-2244-0028

For citation: Razin K.A., Varfolomeeva K.V., Sednev K.A., Repin V.S., Zelentsova S.A. Study of the capabilities of a detector based on a lanthanum bromide crystal for assessing ¹³⁷Cs activity concentration in deep soil layers. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 3. P. 120–129. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-3-120-129