DOI: 10.25283/2587-9707-2026-2-102-109 УДК 621.039.7+539.16.08+550.835.232

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ СОРТИРОВКИ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННОГО ГРУНТА

А. Е. Пименов, С. Л. Гаврилов, М. Ю. Каленова, А. М. Шведов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 24 марта 2026 г.

Статья посвящена разработке блока радиационного контроля, являющегося ключевым элементом автоматизированной потоковой установки механической сортировки радиоактивно загрязненного грунта. В рамках работы проведен сравнительный анализ различных типов гамма-спектрометров для определения удельной активности радионуклидов в загрязненном грунте. Для выбранных детекторов на основе сцинтилляционных кристаллов NaI(Tl) выполнена оптимизация конструкции блока радиационного контроля, основанная на сравнении минимально определяемой активности с нормативными уровнями. По результатам теоретических и расчетных исследований разработано конструкторское решение для изготовления опытного образца блока радиационного контроля.

Ключевые слова: *радиоактивно загрязненный грунт, радиоактивные отходы, потоковая сортировка грунта, гамма-спектрометрия, методы измерения.*

Введение

Автоматизированная потоковая сортировка радиоактивно загрязненного грунта (РЗГ) имеет большое значение в повышении эффективности и снижении затрат при проведении работ по реабилитации территорий объектов ядерного наследия (ОЯН). Применение такого оборудования позволяет значительно сократить объемы отходов, направляемых на захоронение, и открывает возможности для повторного использования грунтов, что имеет стратегическое значение в вопросах обеспечения экологической безопасности [1].

Вариантом его технической реализации являются установки механической сортировки (УМС) РЗГ, например система FREMES-BM10 [2] производства NUKEM Technologies Engineering Services GmbH (рис. 1).

Однако для успешного внедрения и эксплуатации подобных устройств в современных условиях необходимо соблюдение ряда критериев: модульность конструкции, мобильность и автономность, применение серийно выпускаемого и доступного на территории РФ оборудования и комплектующих, а также способность работать с грунтами, характеризующимися вариативностью радионуклидного состава. Существующие в стране УМС не в полной мере удовлетворяют совокупности этих требований, что обуславливает необходимость создания ее усовершенствованной модели.

Ключевым компонентом УМС РЗГ являются блоки радиационного контроля (БРК). Разработка и внедрение БРК, способных эффективно измерять радиационные характеристики

Рис. 1. Внешний вид УМС РЗГ FREMES-BM10

загрязненного грунта, имеет первостепенное значение для обеспечения качественной сортировки.

Выбор методов детектирования

Для обеспечения требуемой производительности систем сортировки РЗГ приоритет имеют методы, основанные на регистрации гамма-излучения, обладающего достаточной проникающей способностью. Однако применение только дозиметров мощности дозы гамма-излучения оказывается недостаточным, поскольку они предоставляют интегральную оценку поля излучения и не позволяют определять радионуклидный состав. Таким образом, для оценки удельной активности конкретных радионуклидов возникает необходимость применения гамма-спектрометров.

Для выбора оптимальной конфигурации данного оборудования проведена серия измерений, направленных на сравнение характеристик различных типов детекторов. Регистрация спектров проводилась с использованием стандартных точечных источников (^{241}Am, ^{137}Cs и ^{60}Co). В испытаниях были задействованы следующие детекторы:

1 .Сцинтилляционные: NaI(Tl) (Ø40×40, Ø63×63, 100×100×400 мм), $LaBr_3$(Ce) (Ø38×38 мм), $CeBr_3$ (Ø38×38 мм), BGO ($Bi_4Ge_3O_{12}$) (Ø75×75 мм), а также детектор на основе пластикового сцинтиллятора (300×80×34 мм);

2 .Экспериментальный образец на основе ионизационной камеры, заполненной сжатым ксеноном (HPXe).

Полупроводниковые детекторы из особо чистого германия были исключены из рассмотрения на данном этапе работ по причине ограниченной доступности в РФ.

Одновременно с измерениями выполнено моделирование отклика детекторов методом Монте-Карло [3] в программной среде GEANT4. Результаты определения эффективности регистрации излучения точечных изотропных источников в зависимости от чувствительного объема детектора представлены на рис. 2—4.

При фиксированном энергетическом составе падающего излучения и заданной геометрии облучения эффективность регистрации одиночного детектора определяется максимально достижимыми размерами его чувствительного объема, ограниченными технологическими возможностями серийного производства. Повысить эффективность можно за счет суммирования откликов от нескольких детекторов. Однако такой подход сопряжен с существенным увеличением капитальных затрат и сложностями с интеграцией оборудования, а также требует согласованной работы всех компонентов в едином измерительном комплексе. Критерии выбора оптимального детектора во многом зависят от двух ключевых параметров: эффективности регистрации и энергетического разрешения. Они оба напрямую влияют на достоверность определения характеристик нуклидов.

Бóльшая эффективность регистрации, зависящая от материала и размера детектора, позволяет детектировать радионуклиды с более низкими удельными активностями и сокращает погрешность измерений. В то же время высокое энергетическое разрешение минимизирует ширину пиков, что уменьшает влияние излучения остальных радионуклидов на площадь пика данного радионуклида, повышая чувствительность измерений. В некоторых случаях, например при измерении близлежащих пиков (мультиплетов), энергетическое разрешение может оказаться

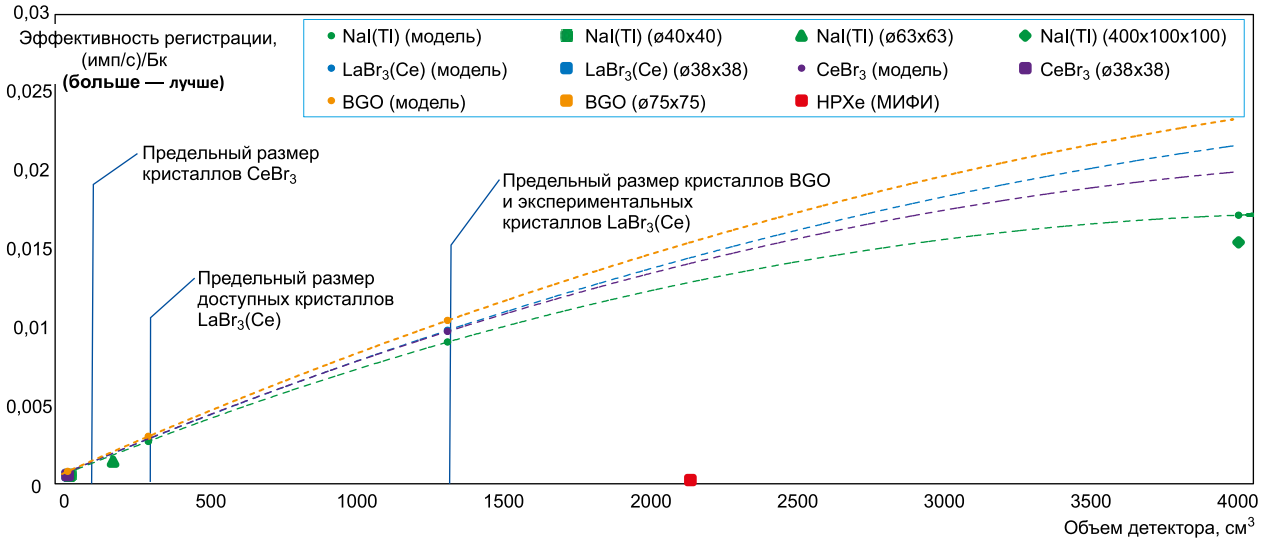

Рис. 2. Эффективность регистрации различными детекторами ^{241}Am (59,5 кэВ) в зависимости от их чувствительного объема

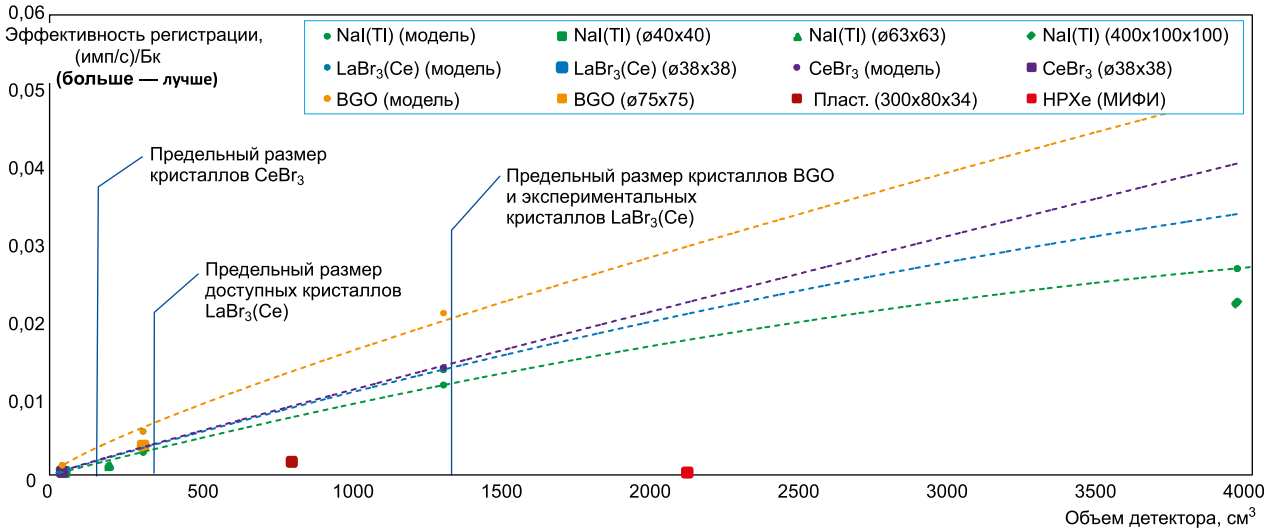

Рис. 3. Эффективность регистрации различными детекторами ^{137}Cs (661,7 кэВ) в зависимости от их чувствительного объема

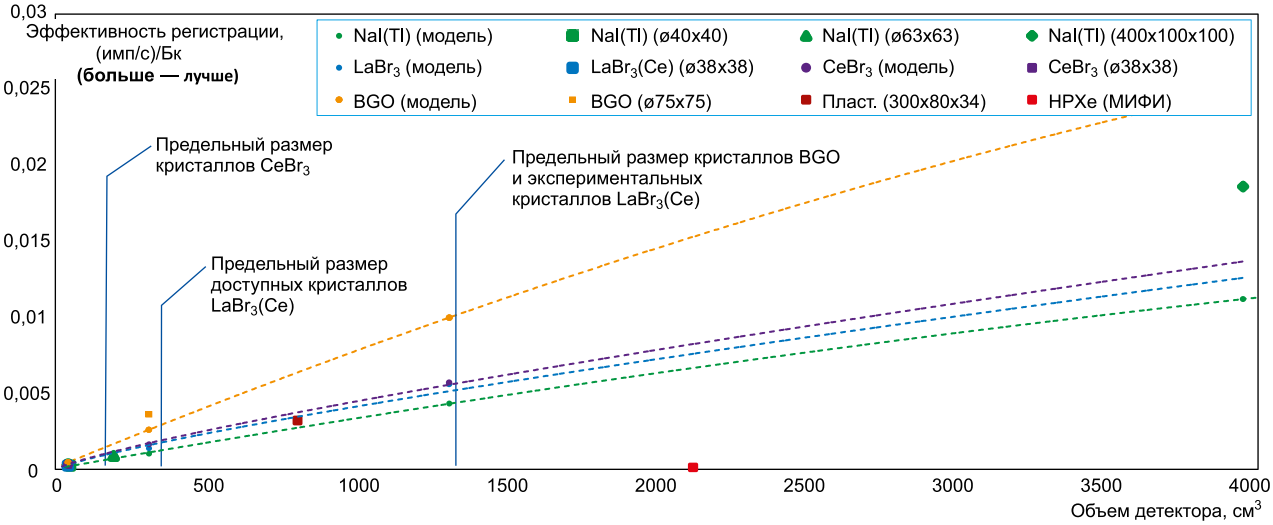

Рис. 4. Эффективность регистрации различными детекторами ^{60}Co (1 173,2 кэВ) в зависимости от их чувствительного объема

критически важным фактором для обеспечения разделения спектральных линий.

Тем не менее в условиях автоматизированного потокового анализа, реализуемого в БРК, задача идентификации и определения площадей пиков для всех возможных гамма-линий, особенно в сложных мультиплетах, не может быть полностью решена из-за ограничений по времени экспозиции и вычислительной сложности алгоритмов обработки. Вследствие этого стратегия разработки БРК была сфокусирована на измерении ограниченного набора гамма-линий легкодетектируемых радионуклидов. Для труднодетектируемых нуклидов (в том числе альфа- и бета-излучателей) или нуклидов, имеющих перекрывающиеся гамма-линии, предполагается использовать косвенный метод оценки на основе «нуклидного вектора» (scaling factor) [4]. При использовании данного метода активность нуклидов, регистрация гамма-излучения которых представляется затруднительной, рассчитывается пропорционально измеренным активностям легкорегистрируемых радионуклидов, входящих в ту же цепочку распада или коррелирующих с ними в соответствии с типичными сценариями образования загрязнений.

Исходя из установленных требований, доступности на рынке РФ, экономической целесообразности и размеров детекторов, а также на основе результатов проведенных испытаний для использования в БРК были выбраны гамма-спектрометры на основе сцинтилляторов NaI(Tl).

Современный серийный ряд детекторов NaI(Tl) включает крупногабаритные образцы, например, с размерами 100 × 100 × 400 мм, обеспечивающие энергетическое разрешение 7—8 %, что является достаточным для надежного разделения основных гамма-линий и превосходит показатели аналогов с сопоставимой эффективностью регистрации, таких как пластиковые сцинтилляторы и BGO. Создание сборки из кристаллов $LaBr_3$(Ce) или $CeBr_3$, превышающих стоимость эквивалентных по эффективности детекторов на основе NaI(Tl) более чем на порядок, экономически нецелесообразно. При этом лучшее энергетическое разрешение не дает существенного преимущества, поскольку прямому измерению подлежат лишь специально выбранные радионуклиды, а активность труднодетектируемых изотопов определяется расчетным путем.

Оптимизация спектрометрического блока

Оптимизация проектных параметров БРК проводилась на основе моделирования отклика детекторов гамма-излучения в геометрии, соответствующей расположению регистрирующего блока над слоем грунта на конвейерной ленте. В ходе расчетных исследований варьировались следующие параметры: толщина слоя грунта, распределение активности в объеме материала (равномерное по объему и поверхностное), габаритные размеры сцинтилляционных кристаллов, а также количество детекторов в регистрирующем массиве. Моделирование их отклика выполнялось для набора, сформированного на основании типового радионуклидного состава грунта. В перечень включены: ^{40}K, ^{137}Cs, ^{241}Am, а также ^{232}Th, ^{238}U и ^{235}U с учетом полных цепочек распада, предполагая, что все дочерние изотопы находятся в равновесии с материнскими. Для учёта собственного и естественного фона, не связанного с измерениями РЗГ, были получены экспериментальные гамма-спектры для детектора NaI(Tl) 100 × 100 × 400 мм и отклики детекторов других размеров путем пересчета экспериментальных данных пропорционально объему сцинтилляционного кристалла.

В качестве реперных уровней загрязненности грунта были выбраны:

- «Уставка 1» — удельная активность, численно равная пределу из Приложения 3 к ОСПОРБ-99/2010 [5] «Удельные активности техногенных радионуклидов, при которых допускается неограниченное использование твёрдых материалов». При отсутствии в нем искомого радионуклида, используется значение из Приложения 4; для ^{40}K применяется данный показатель, соответствующий калиевой соли (KCl).
- «Уставка 2» — удельная активность, численно равная пределу из Приложения 5 к ОСПОРБ-99/2010 «Предельные значения удельных активностей радионуклидов в твердых отходах для отнесения их к радиоактивным отходам».
- «Фоновый уровень» — минимальные концентрации техногенных радионуклидов, а вклад естественных радионуклидов (ЕРН) определяется на основе значений средних удельных активностей, характерных для природного грунта.

Пример расчетных индивидуальных и суммарного гамма-спектров радионуклидов для детектора NaI(Tl) 100 × 100 × 400 мм со значениями удельной активности, соответствующими уровню «Уставки 1», приведен на рис. 5.

Для каждого реперного уровня загрязненности грунта для различных геометрий были выполнены оценки минимально детектируемой активности (МДА) рассматриваемых радионуклидов при задании соответствующих значений

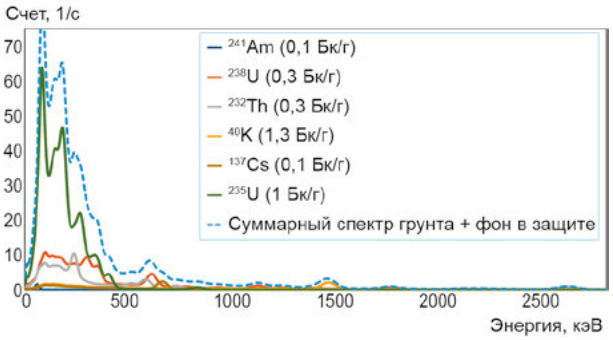

Рис. 5. Расчетные индивидуальные и суммарный гамма-спектры радионуклидов для детектора NaI(Tl) *100×100×400 мм, соответствующие «Уставке 1»*

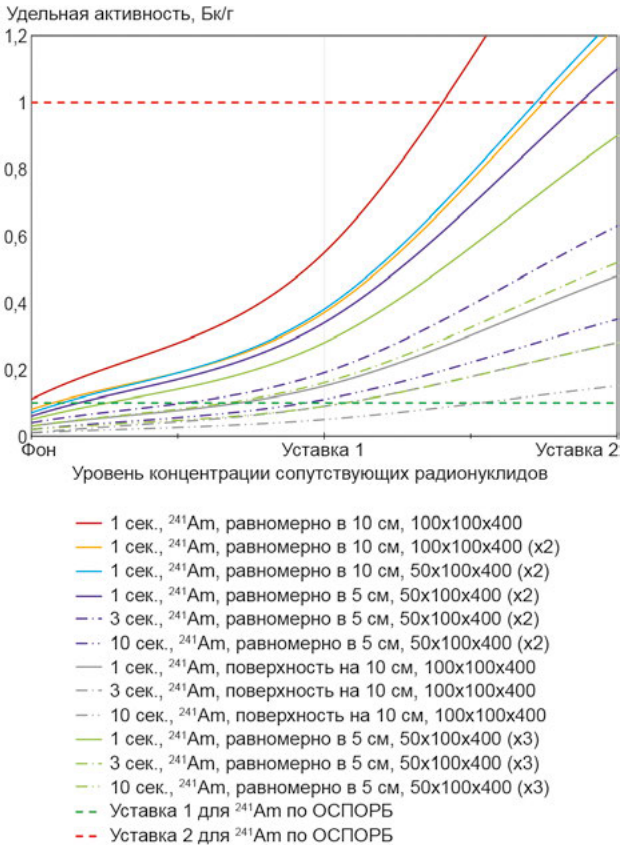

Рис. 6. Сравнение МДА для ^{241}Am *в зависимости от толщины слоя грунта, количества, типа спектрометров и времени экспозиции*

удельных активностей для всех остальных изотопов. Радионуклиды, отличные от анализируемого, рассматривались как «мешающие», излучение которых затрудняет детектирование целевого изотопа за счет перекрытия пиков или увеличения подложки комптоновского рассеяния, что приводит к увеличению МДА.

Таким образом, для каждого радионуклида и разных условий измерения были определены МДА в зависимости от уровня загрязненности грунта. Пример сравнения кривых МДА для ^{241}Am при загрязненности «мешающими» изотопами с уровнями, соответствующими нормативным уставкам, приведен на рис. 6 Кривые приведены для различного количества и типа спектрометров, толщины слоя грунта, а также времени экспозиции.

В соответствии с нормативами [5] классификация загрязненных материалов осуществляется сравнением с единицей суммы отношений всех удельных активностей радионуклидов к их нормированным значениям. В рамках данной модели непревышение кривой МДА конкретного радионуклида горизонтальных уровней нормативных уставок «Уставка 1» и «Уставка 2» в диапазонах «Фон — Уставка 1» и «Уставка 1 — Уставка 2» является лишь границей допустимости в предположении нулевого вклада остальных радионуклидов в сумму отношений. Оптимизация конструкции БРК сводилась к последующей минимизации МДА через варьирование ключевых параметров: геометрии источника и детектора с целью учета самопоглощения для надежной регистрации низкоэнергетических линий и конфигурации детекторного массива с максимизацией суммарной эффективности при сохранении спектрального разрешения и технологических ограничений установки. После выбора конфигурации БРК дальнейшая минимизация МДА выполнялась за счет установления времени измерений и режима работы.

Определенная в результате проведенных исследований итоговая конфигурация БРК представляет собой массив из нескольких детекторов, расположенных боковыми сторонами вплотную друг к другу и смонтированных над конвейерной лентой так, чтобы их оси были ориентированы перпендикулярно направлению движения. Такое расположение будет способствовать повышению чувствительности измерений и позволит реализовать позиционно-чувствительный режим работы, регистрируя профили изменения удельной активности во времени.

В результате исследования было получено, что предложенная конструкция БРК позволит успешно детектировать целевые радионуклиды, исключение составляют некоторые комбинации «мешающих» нуклидов, которые могут усложнить непосредственное определение активности ^{241}Am. Для этого в БРК будет предусмотрена возможность определения удельной активности несколькими методами одновременно: напрямую (по измерениям) и косвенно (расчетным путем на основе «нуклидного вектора», с использованием значения активности легкодетектируемых радионуклидов). При этом их перечень для измерения, а также коэффициенты

нуклидного вектора формируются лабораторией радиационного контроля предприятия на основании результатов лабораторного анализа репрезентативных проб грунта конкретной площадки и заносятся в программное обеспечение БРК перед началом работ.

Разработка конструкции БРК

При проектировании конструкции защиты блока детекторов выполнены расчетные и экспериментальные исследования для оценки влияния толщины свинцового экрана на характеристики измерений. Моделирование вклада гамма-излучения грунта, расположенного на транспортерной ленте вне измерительной зоны детекторов, показало, что увеличение толщины боковой свинцовой защиты свыше 6 мм приводит к дополнительному снижению фоновой составляющей менее чем на доли процента в энергетических окнах, представляющих практический интерес. Экспериментальная оценка естественного фона с различными вариантами защит (рис. 7) подтвердила необходимость экранирования, а также выявила, что увеличение толщины свинца свыше 6 мм нецелесообразно.

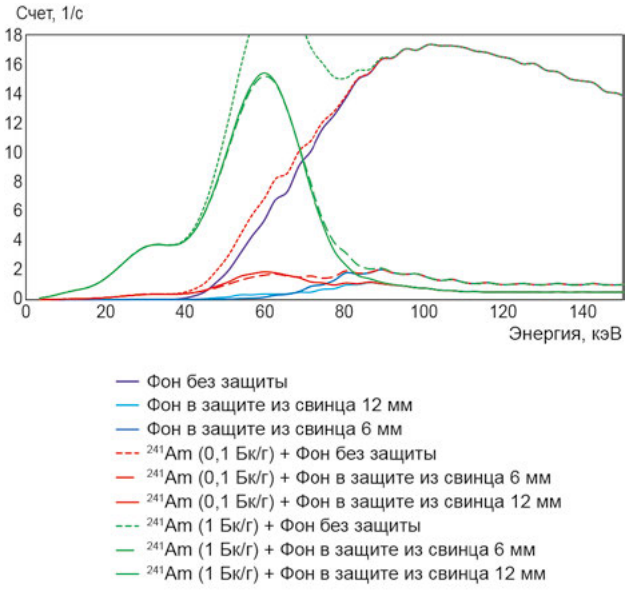

Рис. 7. Регистрация пика от ^{241}Am (0,1 и 1 Бк/г) при различной защите

В качестве технического решения принята конструкция корпуса детекторов БРК (рис .8), обеспечивающая коллимацию со стороны транспортерной ленты и экранирование от внешнего фона посредством свинцовой защиты толщиной 6 мм.

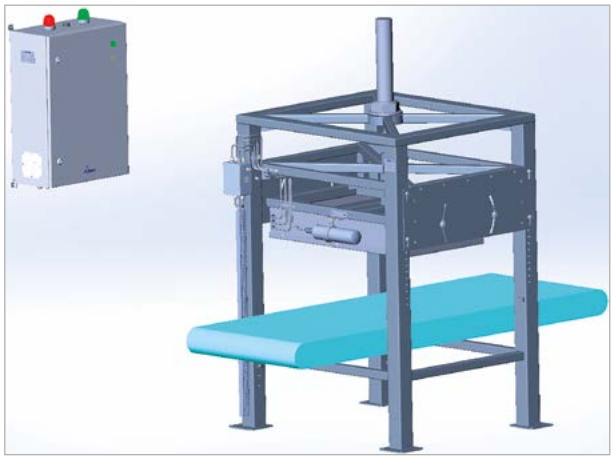

Рис. 8. Внешний вид конструкции БРК

Для повышения надежности БРК дополнительно оснащается широкодиапазонным дозиметром гамма-излучения на случай потенциального отказа или превышения пределов измерений для высокочувствительных гамма-спектрометров. Опционально предусмотрена возможность дополнительного оснащения БРК устройством детектирования плотности потока бета-излучения с функциями компенсации гамма-фона. Следует отметить, что вследствие значительного самопоглощения бета-излучения слоем грунта получаемые данные будут носить оценочный характер и не смогут использоваться для нормативной классификации материалов. Основное назначение бета-канала — оперативная индикация аномалий: выявление локальных зон с повышенным содержанием чистых бета-излучателей (например, Sr-90), активность которых может не коррелировать с гамма-индикаторами в рамках метода нуклидного вектора. Полученные данные применяются в качестве сигнала для приоритетного отбора контрольных проб и верификации применимости заданного нуклидного вектора.

Заключение

В результате проведенных исследований было принято решение об использовании в разрабатываемом БРК крупногабаритных детекторов NaI(Tl) с оптимизированной геометрией и конструктивным исполнением, обеспечивающим требуемую чувствительность для определения удельной активности целевых радионуклидов в грунте. Предполагается реализация двух методов оценки активности: прямого, по площади пиков гамма-излучения целевых радионуклидов, и косвенного, с использованием метода нуклидного вектора. Полученные в работе результаты послужат основой для разработки

алгоритмов программного обеспечения, регламентации процедур измерений и определения интерфейсных параметров интеграции БРК в состав УМС РЗГ. В последующем планируется изготовление опытного образца блока радиационного контроля и проведение комплексных испытаний в условиях реальных площадок с РЗГ для подтверждения проектных параметров.

Литература

1 . Remediation Strategy and Process for Areas Affected by Past Activities or Events. International Atomic Energy Agency. — Vienna, IAEA, 2022. P. 199.
2 . Management of Radioactive Waste. — URL: https://www.nukemtechnologies.de/en/portfolio/management-of-radioactive-waste (дата обращения: 20 .01 .2026
3 . *Gavrilov S. L., Pimenov A. E., Shvedov A. M. et al.* Determination of the dose rate from the pulse-height spectra of an airborne gamma-ray spectrometer based on an unmanned aerial vehicle // Atomic Energy. 2023. Vol. 135. No. 1—2. Pp. 74—80. DOI: 10 .1007/s10512-024-01084 w.
4 . ISO 21238:2007. Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants. ISO, 2007.
5 . СП 2 .6 .1 .2612- Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Санитарные правила и нормативы. — М., 2010. 77 с.

Информация об авторах

Пименов Артем Евгеньевич, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: artisl@ibrae .ac .r
Гаврилов Сергей Львович, заведующий отделением, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: gav@ibrae .ac .r
Каленова Майя Юрьевна, кандидат технических наук, руководитель проекта, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: MYKalenova@ibrae .ac .r
Шведов Антон Максимович, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: sham@ibrae .ac .r

Библиографическое описание статьи

Пименов А. Е., Гаврилов С. Л., Каленова М. Ю., Шведов А. М. Разработка измерительной системы для задач сортировки радиоактивно загрязненного грунта // Радиоактивные отходы. 2026. № 2 (35). С .102—109. DOI: 10 .25283/258 -9707-2026-2-102-109.

DEVELOPMENT OF A MEASUREMENT SYSTEM FOR SORTING RADIOACTIVELY CONTAMINATED SOIL

Pimenov A. E., Gavrilov S. L., Kalenova M. Yu., Shvedov A. M.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on March 24, 2026

The paper elaborates on the development of a detection system proposed as an essential component of an automated continuous-fl w mechanical system designed for radioactively contaminated soil sorting. It compares various types of gamma spectrometers to determine the specifi activity of radionuclides in such soil. It also presents the optimized

designs of the detection system for the selected NaI(Tl) *scintillation detectors based on the criterion of minimum detectable activity compared against regulatory limits. The theoretical and calculation studies yielded an engineering design of a prototype detection system.*

Keywords: *radioactively contaminated soil, radioactive waste, soil sorting, gamma spectrometry, measurement methods.*

References

1 . Remediation Strategy and Process for Areas Affected by Past Activities or Events. International Atomic Energy Agency. Vienna, IAEA Publ., 2022. P.199.

2 . Management of Radioactive Waste. — URL: https://www.nukemtechnologies.de/en/portfolio/management-of-radioactive-waste (accessed on: January 20, 2026).

3 . Gavrilov S. L., Pimenov A. E., Shvedov A. M. et al. Determination of the dose rate from the pulse-height spectra of an airborne gamma-ray spectrometer based on an unmanned aerial vehicle. *Atomic Energy,* 2023, vol. 135, no. 1—2, pp. 74—80. DOI: 10 .1007 s10512-024-01084-w.

4 . ISO 21238:2007. Scaling factor method to determine the radioactivity of low- and intermediate-level radioactive waste packages generated at nuclear power plants. ISO, 2007.

5 . SP 2 .6 .1 .2612- *Osnovnyye sanitarnyye pravila obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti* [Basic Sanitary Rules for Radiation Safety] (OSPORB-99/2010). *Sanitarnyye pravila i normativy* [Sanitary Rules and Regulations]. Moscow, 2010. 77 p.

Information about the authors

Pimenov Artem Evgenevich, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: artisl@ibrae .ac .r

Gavrilov Sergey Lvovich, Head of division, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: gav@ibrae .ac .r

Kalenova Maiia Yurievna, PhD, Project manager, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: MYKalenova@ibrae .ac .r

Shvedov Anton Maximovich, Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: sham@ibrae .ac .r

Bibliographic description

Pimenov A. E., Gavrilov S. L., Kalenova M. Yu., Shvedov A. M. Development of a Measurement System for Sorting Radioactively Contaminated Soil. *Radioactive Waste,* 2026, no. 2 (35), pp. 102—109. DOI: 10 .25283/258 -9707-2026-2-102-109. (In Russian).