

УДК 539.16.07

## ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВЫВОДА ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С. Е. Улин, В. В. Дмитренко, К. Ф. Власик, В. М. Грачев, Р. Р. Егоров,  
К. В. Кривова, А. И. Маджидов, З. М. Утешев, И. В. Чернышева,  
А. Е. Шустов

*Рассмотрена структура гамма-спектрометрических комплексов для вывода ядерных объектов из эксплуатации. Представлены физико-технические характеристики ксенонового гамма-спектрометра, являющегося основным прибором для измерения спектров гамма-излучения анализируемых объектов и определения их активности. Показана целесообразность использования ксеноновых гамма-спектрометров при выводе ядерных объектов из эксплуатации. Информация, получаемая с помощью гамма-спектрометрического комплекса, передается по интернету на удаленный компьютер для обработки экспериментальных данных в режиме реального времени.*

**Ключевые слова:** гамма-излучение, энергетический спектр, ксенон, нуклид, ядерный объект.

*Введение.* Действующая “Концепция по выводу из эксплуатации ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения” была утверждена госкорпорацией “Росатом” в феврале 2008 года. Согласно этому документу при выводе из эксплуатации ядерных и радиационно опасных объектов (ВЭ ЯРОО) предусматривается комплекс организационных и технических мероприятий, осуществляемых после окончательной остановки ядерных объектов. Для успешного выполнения программы по ВЭ ЯРОО большое значение имеет качественный уровень оборудования, используемого для обнаружения и диагностики радиоактивных и делящихся материалов.

---

НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: seulin@gmail.com.

После аварий на атомных электростанциях (АЭС) в Three Mile Island, Чернобыле и Фукусиме стало ясно, что необходимо проведение дальнейших научных разработок и создание новых измерительных комплексов для решения задач ВЭ ЯРОО. При этом важными требованиями, предъявляемыми к измерительной аппаратуре, являются беспроводное управление, наличие систем видеонаблюдения и контроля, возможность передачи экспериментальных данных с помощью телеметрии на удаленные компьютерные системы и обработки информации в режиме реального времени.

За последние 30-40 лет во многих странах созданы различные роботизированные комплексы радиационного контроля, позволяющие заменить людей при выполнении работ в условиях повышенной радиационной обстановки. В качестве примера на рис. 1 приведена фотография типичной роботизированной установки Робот RESCUER на колесной и гусеничной основе, созданной японскими специалистами [1].

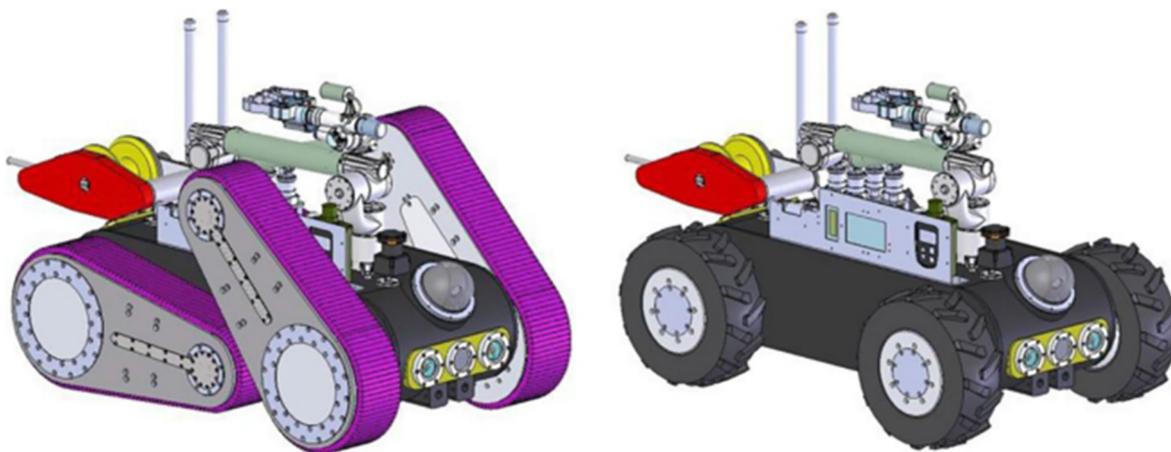


Рис. 1: Робот RESCUER на колесной и гусеничной основе.

Робот RESCUER предназначен для обнаружения радиоактивных объектов и отбора проб. Навигация этого устройства включает в себя использование системы кодирования и глобального позиционирования. Кроме того, эта роботизированная установка оборудована колесами или гусеницами для преодоления препятствий.

Большинство созданных роботизированных систем состоят из двух частей: перемещаемой платформы и расположенного на ней блока детектирующей аппаратуры с системами управления и навигации. Современные роботизированные комплексы отличаются друг от друга аппаратурой для регистрации различных компонент ионизирующего излучения.

Несмотря на большое разнообразие автоматизированных измерительных комплексов, которые используются для ВЭ ЯРОО, создание новых детектирующих систем остается весьма актуальным. Прежде всего, это касается гамма-спектрометров с высокими эксплуатационными характеристиками. Использование новой гамма-спектрометрической аппаратуры дает возможность изучать не только интегральные потоки ионизирующих частиц, но и их дифференциальные спектры, определять изотопный состав и активность исследуемых радиоактивных источников.

В данной статье рассматривается ксеноновый гамма-спектрометр, его основные физико-технические характеристики, и анализируется возможность его применения для обращения с ядерными и делящимися материалами, а также использования при устранении различных аварий на АЭС.

*Анализ основных характеристик ксеноновых гамма-спектрометров.* Основным детектирующим элементом ксенонового гамма-спектрометра (КГС) является цилиндрическая импульсная ионизационная камера с экранирующей сеткой. Камера наполнена сжатым ксеноном. На рис. 2 представлены фотография и принципиальная схема КГС с рабочим объемом 2 литра. Его характеристики представлены в табл. 1.

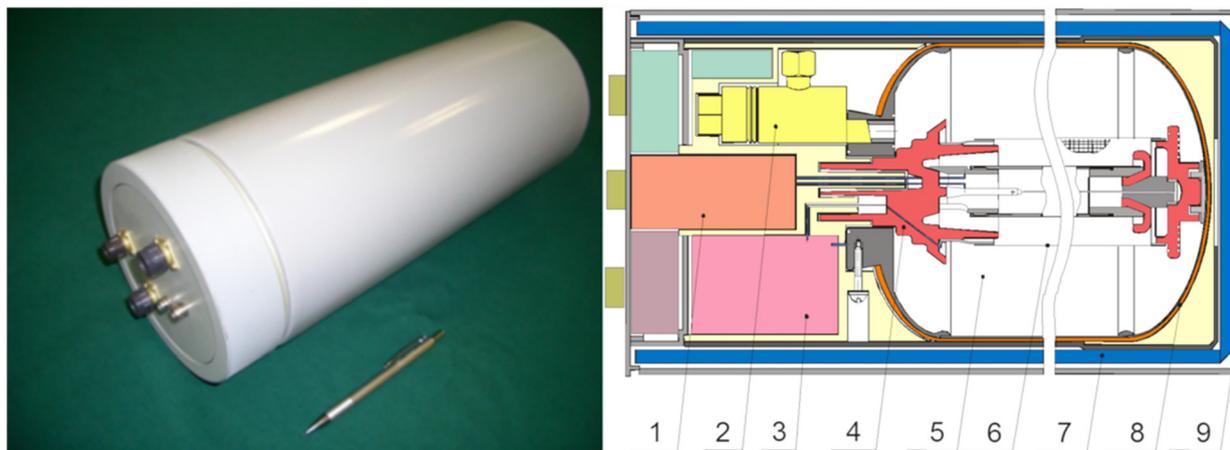


Рис. 2: Фотография и схема КГС: 1 – зарядочувствительный усилитель, 2 – кран для наполнения рабочим веществом, 3 – источник питания, 4 – керамический гермоввод, 5 – ионизационная камера, 6 – экранирующая сетка, 7 – тефлоновая изоляция, 8 – стальной корпус с композитным покрытием, 9 – внешний защитный корпус.

Для определения энергетического разрешения использовались образцовые спектрометрические гамма-источники (ОСГИ). В качестве примера на рис. 3 приведены гамма-спектры от гамма-источников  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Аналогичные измерения были про-

ведены с детектором на основе кристалла NaI(Tl) размером  $\text{Ø}7.62 \text{ см} \times 7.62 \text{ см}$ . Его энергетическое разрешение примерно в пять раз хуже, чем у КГС.

Т а б л и ц а 1

Основные физико-технические характеристики КГС

Плотность рабочего вещества (ксенона), г/см <sup>3</sup>	0.3
Диапазон измеряемых энергий гамма-квантов, МэВ	0.05–5
Энергетическое разрешение для энергии гамма-квантов 662 кэВ, %	$1.7 \pm 0.3$
Эффективность регистрации гамма-квантов с энергией 662 кэВ, %	6
Рабочий объем, см <sup>3</sup>	2000
Масса, кг	5
Габариты, см	$\text{Ø}15 \times 45$
Энергопотребление, Вт	20
Напряжение питания, В	24

На рис. 4 показана зависимость энергии гамма-квантов различных радионуклидов от номера канала КГС, из которой следует, что интегральная нелинейность КГС в диапазоне энергий (50–3000) кэВ не превышает 1%.

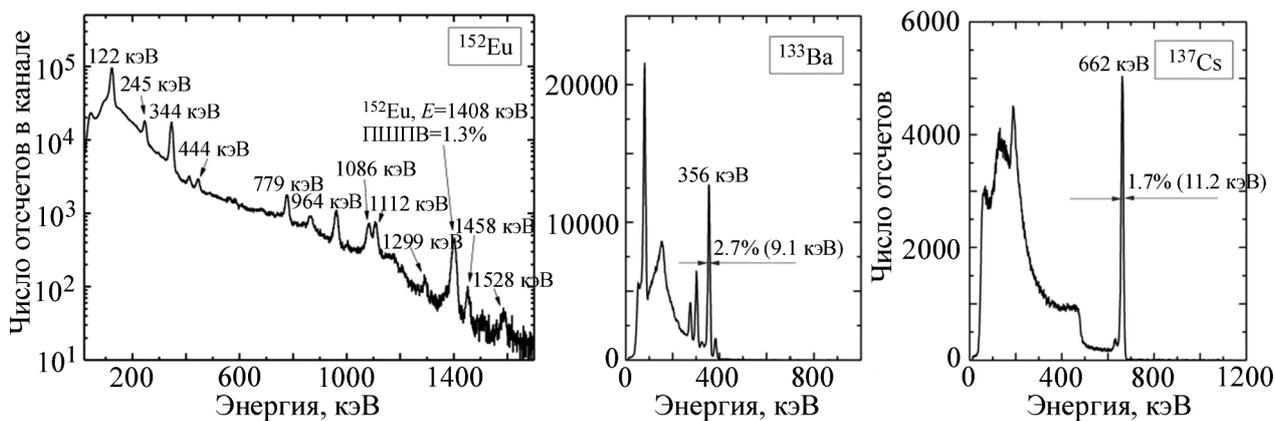


Рис. 3: Спектры гамма-источников <sup>152</sup>Eu, <sup>133</sup>Ba и <sup>137</sup>Cs, измеренные КГС.

Наиболее длительный период измерения спектрометрических характеристик ксенонового гамма-спектрометра “КСЕНИЯ” был проведён на орбитальной станции “МИР” [2]. Результаты долговременных измерений энергетического разрешения гамма-спектрометра и положения аннигиляционной линии 511 кэВ показаны на рис. 5.

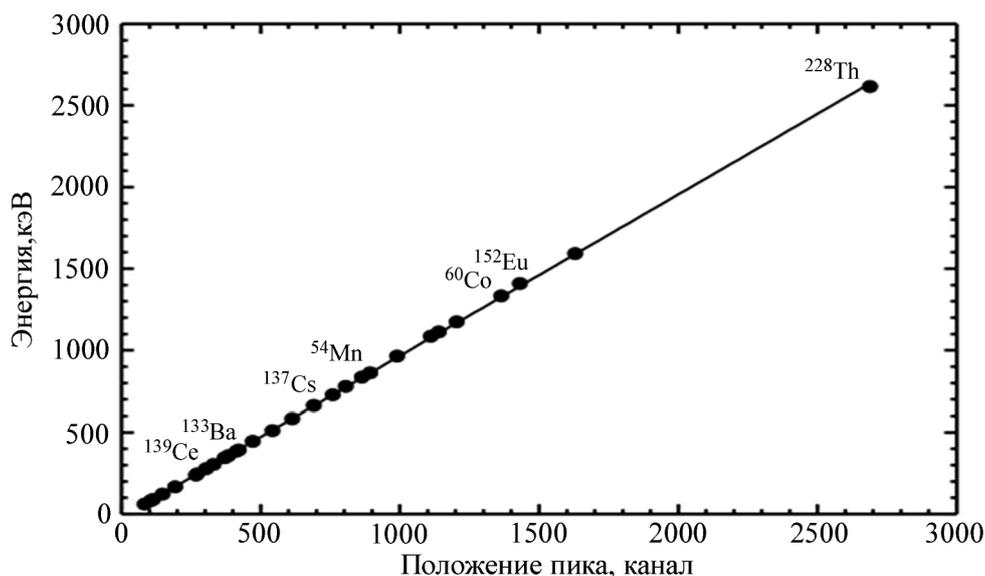


Рис. 4: Зависимость энергии гамма-квантов от положения (номера канала) пика полного поглощения, измеренная для КГС.

Из рис. 5 видно, что в пределах ошибок энергетическое разрешение гамма-спектрометра практически не меняется со временем, а изменение положения гамма-пика в течение шести лет не превышает 0.5 канала или 2 кэВ. Приведенные результаты убедительно демонстрируют стабильность основных спектрометрических характеристик ксенонового гамма-спектрометра в течение шести лет его непрерывной работы на орбите.

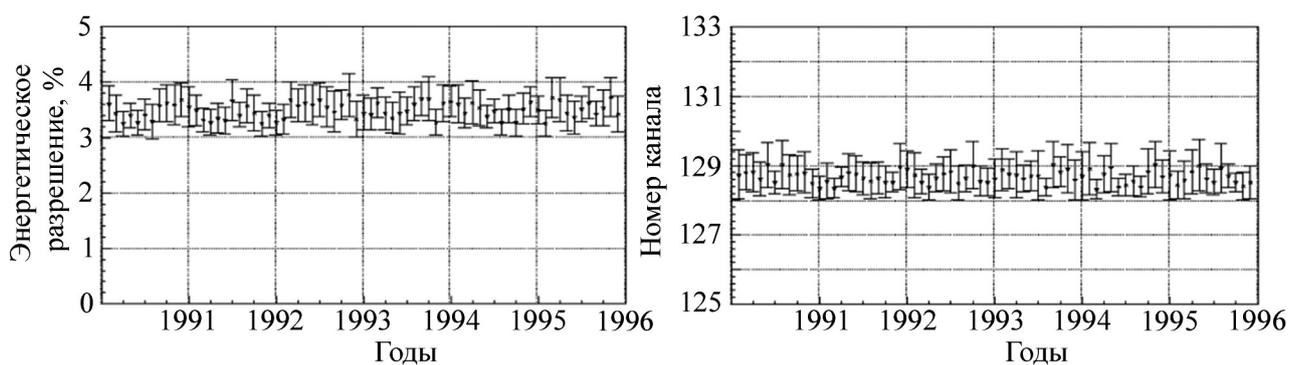


Рис. 5: Зависимости от времени энергетического разрешения гамма-спектрометра «КСЕНИЯ» и положения пика аннигиляционной линии 511 кэВ в его каналах.

В лабораторных условиях исследовалось влияние потоков нейтронов на спектрометрические свойства КГС [3]. Для сравнения, в экспериментах использовался также сцинтилляционный детектор, состоящий из кристалла NaI(Tl) размером  $\varnothing 8 \times 5$  см. Эти спектрометры облучались нейтронами Pu-Be источника с активностью  $4.2 \cdot 10^5$  нейтрон/сек. Флюенс нейтронов через каждый детектор составлял  $10^{10}$  нейтронов.

На рис. 6 показаны фоновые гамма-спектры, измеренные с помощью КГС и сцинтилляционным детектором NaI(Tl) до (1) и после (2) облучения их нейтронами от Pu-Be источника. На этом рисунке отчетливо видно, что в результате активации КГС в спектре появились несколько гамма-линий в области энергий меньше 0.3 МэВ и одна в районе 0.85 МэВ, а для сцинтилляционного детектора NaI(Tl) наблюдается лишь увеличение общего числа отчетов в каждом канале.

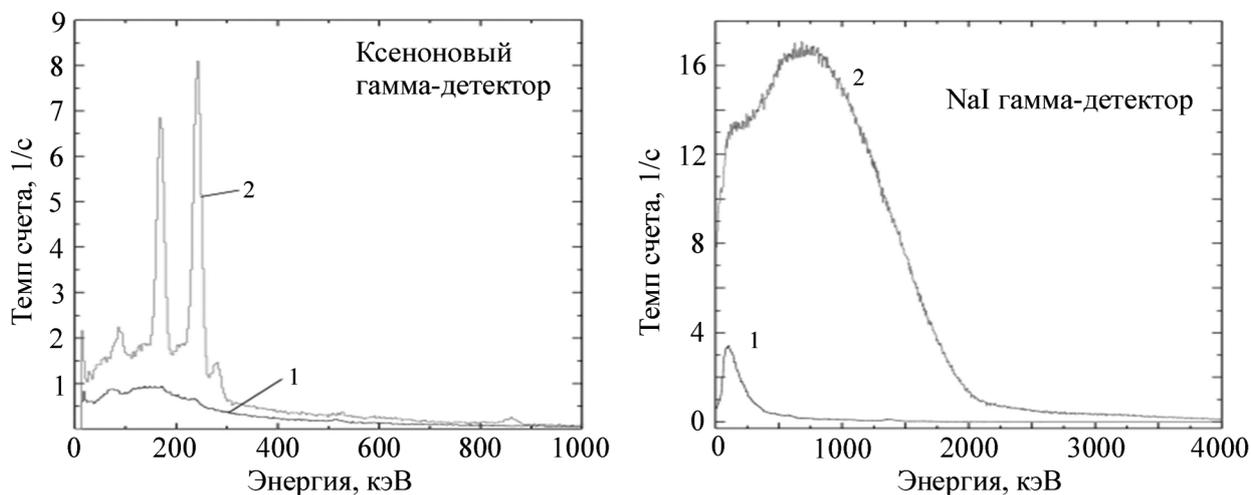


Рис. 6: Фоновые спектры, измеренные КГС и сцинтилляционным детектором NaI(Tl) до (1) и после (2) их облучения нейтронами от Pu-Be источника.

Наиболее сильно это увеличение (более чем на порядок) проявляется для энергий ниже 2 МэВ для NaI(Tl) детектора. У КГС изменение положения гамма-линии и ухудшение энергетического разрешения не наблюдалось. Общая активация NaI(Tl) детектора оказалась существенно выше, чем КГС. В первые часы после окончания нейтронного облучения отношение темпа счета  $K_{\text{NaI(Tl)}}/K_{\text{Xe}}$  достигало значения 30 и затем постепенно уменьшалась до 4–2. Время восстановления сцинтилляционного детектора составило несколько десятков часов, а ксенонового детектора – не более 3 часов (оно определяется периодами полураспада возбужденных ядер Xe). При этом вклад в общую интенсивность гамма-линий, связанных с активацией ядер ксенона, даже в первые минуты после

окончания облучения не превышает  $1 \text{ импульс} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{кэВ}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

Было установлено, что положение гамма-линии в спектре NaI(Tl) детектора с увеличением нейтронного потока постепенно смещается в сторону больших энергий. При потоке нейтронов  $40 \text{ нейтрон}/\text{с} \cdot \text{см}^2$  это смещение положения пика  $^{137}\text{Cs}$  составляет 2.8% и энергетическое разрешение NaI(Tl) детектора ухудшается на 8%. У ксенонового гамма-детектора изменение этих характеристики не наблюдалось.

Для уменьшения влияния внешних виброакустических воздействий в КГС используются методы цифровой обработки электрических сигналов в режиме реального времени [4].

На рис. 7 представлены зависимости энергетического разрешения КГС на линии 1332 кэВ (источник  $^{60}\text{Co}$ ) и 662 кэВ (источник  $^{137}\text{Cs}$ ) от уровня внешнего акустического воздействия, полученные при использовании цифровых и аналоговых методов обработки данных.

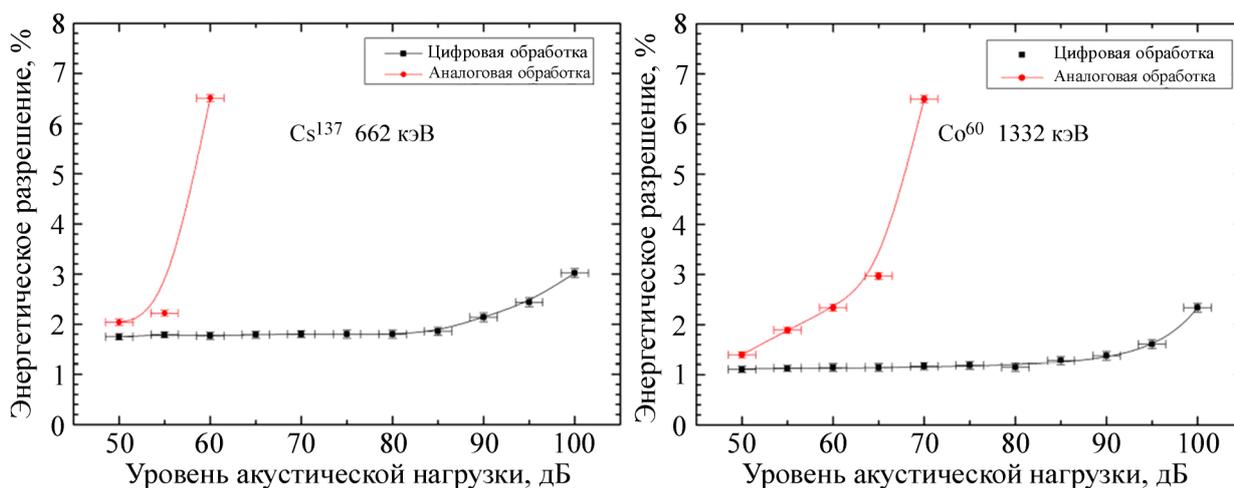


Рис. 7: Зависимость энергетического разрешения КГС на линии 662 кэВ (источник  $^{137}\text{Cs}$ ) и 1332 кэВ (источник  $^{60}\text{Co}$ ) от уровня акустической нагрузки.

Как следует из рис. 7, энергетическое разрешение КГС на линии 662 кэВ при использовании блока цифровой электроники практически не ухудшается до уровня акустической нагрузки  $\sim 90$  дБ. При использовании обычной (аналоговой) электроники энергетическое разрешение гамма-спектрометра резко ухудшается уже при уровне акустической нагрузки 60 дБ.

*Заключение.* Автоматизированные комплексы для мониторинга и характеристики ядерных загрязнений окружающей среды радиоактивными веществами в результате

аварий на АЭС позволяют уменьшить дозовую нагрузку на персонал и проводить работы при высоких уровнях радиации. Для определения изотопного состава радиоактивных источников на современные робототехнические комплексы устанавливаются различные гамма-спектрометры, одним из которых может быть ксеноновый гамма-спектрометр. Представленные в данной статье материалы демонстрируют, что КГС обладают высоким энергетическим разрешением ( $1.7 \pm 0.3$ )% для энергии гамма-квантов 662 кэВ, которое в несколько раз выше, чем у наиболее популярных сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов NaI(Tl). Интегральная нелинейность ксенонового гамма-спектрометра составляет менее 1% в энергетическом диапазоне 50–3000 кэВ. При облучении нейтронами у КГС изменение положения измеряемых гамма-линий и ухудшение энергетического разрешения при потоках нейтронов до 40 нейтрон/с·см<sup>2</sup> не наблюдается. Ксеноновый гамма-спектрометр способен работать при использовании блока цифровой электроники в обстановке с уровнем акустической нагрузки до 90 дБ без ухудшения энергетического разрешения. Долговременная стабильность КГС позволяет использовать его в течение длительного времени (более 10 лет) без изменения спектрометрических характеристик. Управление ксеноновым гамма-спектрометром и обработка данных в режиме реального времени осуществляется дистанционно с помощью одного компьютера.

Указанные свойства КГС позволяют использовать его для обнаружения и идентификации радиоактивных и делящихся материалов с целью обеспечения радиационной безопасности при обращении с радиоактивными отходами и в процессе вывода из эксплуатации АЭС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61419X0003).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. Guzman, R. Navarro, J. Ferre, M. Moreno, J. Field Robot. **33**, 931 (2016). DOI: 10.1002/rob.21588.
- [2] S. E. Ulin, K. F. Vlasik, A. M. Galper, et al., In: Proc. SPIE **3114**, 499 (2017). DOI: 10.1117/12.283789.
- [3] K. F. Vlasik, V. M. Grachev, V. V. Dmitrenko, et al., Instrum. Exp. Tech. **41**(3), 309 (1998).

- [4] A. S. Novikov, S. E. Ulin, I. V. Chernysheva, et al., In: Proc. SPIE **9213**, 921318 (2014).  
DOI: 10.1117/12.2060812.

Поступила в редакцию 11 марта 2020 г.

После доработки 20 апреля 2020 г.

Принята к публикации 21 апреля 2020 г.