

Новый метод определения активности источников гамма-излучения, находящихся за слоем поглотителя с априорно неизвестными свойствами – Метод G-фактора.

В.В. Дровников, М.В. Егоров, Н.Ю. Егоров*, В.М. Живун, А.В. Кадушкин, В.В. Коваленко

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» – НИЯУ МИФИ.
Лаборатория «Ядерно-физические технологии радиационного контроля» – НИЛ ЯФТРК.

Для контактов: Тел.: (903) 210-23-59, (495) 788-56-99 доб. 8463
Адрес электронной почты: egorov@radiation.ru web-адрес: www.radiation.ru

Представлены результаты разработки гамма-спектрометрического метода определения кратности ослабления гамма-излучения в слое материала, расположенного между источником и детектором непосредственно по спектру гамма-излучения источника, измеренному за этим слоем. При этом никакая априорная информация о характеристиках слоя – химический состав, размеры, геометрия и т.д., а также отбор проб слоя или вспомогательные измерения, в т.ч. предварительные измерение спектра без поглощающего слоя, не используются. Рабочее название созданного метода – «Метод G-фактора».

Метод G-фактора позволяет определять кратность ослабления гамма-излучения непосредственно из измеренного спектра при наличии в нем хотя бы одного пика полного поглощения.

Приводятся результаты экспериментальной проверки работоспособности метода в диапазоне величин кратности ослабления $1 - 10^3$ для воды, алюминия, меди и свинца с использованием NaI сцинтилляционных и HPGe гамма-спектрометров.

New method for shielded gamma sources activity determination – G-factor method.

V.V. Drovnikov, M.V. Egorov, N.Y. Egorov, V.M. Zhivun, A.V. Kadushkin, V.V. Kovalenko
National Research Nuclear University «Moscow Engineering Physics Institute».
Nuclear Radiation Monitoring Laboratory.

For contacts:

Phone: +7 (903) 210-23-59, +7 (495) 788-56-99 ext. 8463
E-mail: egorov@radiation.ru
Web-address: www.radiation.ru

Abstract. The results of the development of new gamma-spectrometry method for shield attenuation factor determination are presented. The value of shield attenuation factor is excerpted from shielded gamma source spectrum directly. No priory information about the shield or shield material sampling is used. The gamma spectrum of the unshielded source is not used too. The only one peak in the spectrum is enough to calculate the shield attenuation value. The method name is "G-factor method".

The results of G-factor method testing with HPGe and NaI(Tl) spectrometers are presented for H₂O, Al, Cu and Pb as shielding materials for shield attenuation factor value range from 1 to 10³.

Существует достаточно большое количество задач, в которых необходимо определять радионуклидный состав и активность источников гамма-излучения, находящихся в контейнерах или за какими-либо поглотителями. При этом сами источники могут быть точечными с пренебрежимо малым самопоглощением или объемным с заметным самопоглощением. Кроме того, любая объемная композиция радиоактивных и нерадиоактивных материалов (твердых, жидких и газообразных; гомогенная или гетерогенная) может рассматриваться как источник гамма-излучения, отделенный от детектора поглощающим слоем.

Радионуклидный состав источника достаточно просто может быть установлен методами гамма-спектрометрии. В подавляющем большинстве случаев знания свойств контейнера или поглотителя для этого не требуется. Достаточно набрать спектр с хорошей статистикой, используя для этого спектрометр с соответствующими эффективностью и энергетическим разрешением.

Активность Q находящегося за поглотителем источника может быть определена по следующей формуле:

$$Q = \frac{C_p}{\varepsilon \cdot Y} \cdot K \quad (1),$$

где C_p – скорость счета в пике полного поглощения; ε – эффективность регистрации в пике полного поглощения; Y – квантовый выход; K – кратность ослабления гамма-излучения в поглощающем слое и самом источнике.

Заметим, что определение эффективности спектрометра каких-либо проблем не представляет.

Кратность ослабления гамма-излучения в поглощающем слое и самом источнике, т.е. поправки на поглощение и самопоглощение, могут быть определены как из соответствующих калибровочных измерений, так и расчетным путем. Для применения расчетных методов необходима информация о свойствах поглотителя и источника (размеры, геометрия, материал и т.д.).

На практике в значительном количестве случаев проведение калибровочных измерений для определения поправок на поглощение и самопоглощение достаточно затруднительно или вообще невозможно, а информация о свойствах поглотителя и источника или принципиально недоступна, или может быть получена только различными вспомогательными способами (отбор проб для лабораторных исследований, взвешивание, просвечивание внешними источниками и т.д.), что делает такие измерения затратными во всех смыслах. Отметим, что в случае отбора проб объекта для их последующих лабораторных измерений необходимо обеспечивать корректность пробоотбора, т.е. выполнение следующих основных требований: представительность отбираемых проб, отсутствие в них артефактов, достаточность количества отобранных проб для описания объекта и т.д.

Можно указать достаточно много реальных задач, в которых ситуация выглядит именно таким образом.

Пусть с использованием переносного гамма-спектрометра внутри морского транспортного контейнера или грузового автомобиля удалось обнаружить радионуклидный источник ^{137}Cs . Определить активность источника без вскрытия контейнера обычными методами не удастся, т.к. неизвестно количество поглощающего материала между источником и спектрометром. «Голый» источник относительно небольшой активности и очень мощный источник в защитном контейнере могут дать одну и ту же скорость счета в пике полного поглощения. Хотелось бы перед вскрытием транспортного контейнера знать, с чем предстоит иметь дело: с «голым» источником в 100 микроКюри или в 10^3 Кюри в мощном контейнере?

Другой пример. Пусть в относительно небольшом контейнере с поглощающими стенками находится смесь из радиоактивных и нерадиоактивных материалов. Смесь может быть образована достаточно разнообразными компонентами: стружка, грунт, ветошь, фильтры, мелкие фрагменты конструкций и деталей и т.д. Контейнер был упакован достаточно давно и информация об активности находящихся в нем материалов отсутствует или по каким-либо соображениям должна быть уточнена. По целому ряду причин неприемлемо открывать контейнер для рассортировки его начинки и последующих ее измерений. Задача могла бы быть решена методами HPGe гамма-спектрометрии при наличии соответствующих поправок на поглощение и самопоглощение, однако их определение представляется в данном случае весьма непростым делом.

Еще один пример. Измерение радиоактивных отложений на внутренних поверхностях технологического оборудования и трубопроводах. Информация о первоначальной толщине стенок трубы может быть недоступна или недостоверна, кроме того, она наверняка отличается от истинной из-за коррозии и отложения продуктов коррозии. Конфигурация отложений продуктов коррозии и толщина отложений тоже неизвестны. Т.е. ввести корректные в полном смысле слова расчетные поправки вряд ли удастся.

Еще один пример – определение характеристик старого, т.е. достаточно сильно заглубленного в грунт в смысле учета эффекта поглощения гамма-излучения, радиоактивного загрязнения местности для оценки степени ее опасности, планирования реабилитационных мероприятий и контроля их проведения, определения объема и характеристик образующихся при реабилитации РАО. Применение *In situ* гамма-спектрометров, в частности **ISOCSCANBERRA** и **ISOCART-ORTEC**, позволит определить характеристики такого загрязнения [1, 2]. Однако для этого предварительно должны быть созданы так называемые шаблоны, описывающие профили заглубления радионуклидов в грунт и позволяющие сделать поправки на поглощение гамма-излучения в грунте. Эти данные могут быть получены методами лабораторного гамма-спектрометрического радионуклидного анализа достаточно большого числа проб загрязненного грунта (от нескольких десятков до сотен), отобранных на обследуемой территории. Количество и вид отбираемых проб должны корректно описывать распределение радионуклидов по глубине и по обследуемой территории. Отметим, что необходимо, кроме того, осуществить доставку отобранных проб в лабораторию, провести соответствующую пробоподготовку и утилизировать пробы после измерений. Описанные действия занимают достаточно много времени, весьма дорогостоящи, требуют наличия квалифицированного персонала, соответствующего оборудования и т.д.

Аналогично выглядят задачи определения характеристик старых приповерхностных могильников радиоактивных отходов, для которых в настоящее время отсутствует достоверная информация о радионуклидном составе и активности захороненных в них РАО, и радионуклидного загрязнения строительных конструкций и крупного технологического оборудования при подготовке их к выводу из эксплуатации или при проведении реабилитационных мероприятий.

В связи с тем, что корректное решение перечисленных выше и им подобных задач представляется нам весьма необходимым, **в НИЛ ЯФТРК был разработан гамма-спектрометрический метод определения кратности ослабления гамма-излучения в слое материала, расположенного между источником и детектором непосредственно по спектру гамма-излучения источника,**

измеренному за этим слоем. При этом никакая априорная информация о характеристиках слоя или вспомогательные измерения не требуются. Рабочее название созданного метода – «метод G-фактора».

Уточним, что для определения коэффициента поглощения методом G-фактора проводить предварительные измерения спектра без поглощающего слоя не требуется.

В определяемую методом G-фактора величину кратности ослабления уже входит составляющая, обусловленная поглощением в материале источника (самопоглощение). Это весьма ценное свойство метода, т.к. учет самопоглощения может оказаться весьма нетривиальной задачей.

Работоспособности метода G-фактора была проверена в лабораторных и полевых условиях с использованием HPGe полупроводниковых и NaI(Tl) сцинтилляционных гамма-спектрометров.

На рисунке 1 приведены результаты экспериментального определения на HPGe гамма-спектрометре коэффициентов ослабления гамма-излучения точечного источника ^{137}Cs с помощью метода G-фактора и по отношению скоростей счета в пиках полного поглощения от источника гамма-излучения без поглотителя и за поглотителем для различных поглощающих материалов и различных толщин поглощающего слоя. При определении коэффициента ослабления по методу G-фактора никакая информация о характеристиках поглотителя не использовалась. Видно, что разработанный метод G-фактора обеспечивает весьма точное определение коэффициентов поглощения в диапазоне $1 - 10^3$.

На рисунке 2 представлена схема эксперимента по определению с помощью NaI(Tl) гамма-спектрометра активности точечного источника ^{137}Cs , находящегося за слоем поглотителя, а также характеристик самого поглотителя. Измерения спектров на двух расстояниях H_1 и H_2 , значения которых определяются с помощью линейки, рулетки и т.д., необходимы для определения полного расстояния детектор – источник.

Активность Q находящегося за поглотителем источника может быть определена по следующей формуле:

$$Q = \frac{(H_2 - H_1)^2}{\sigma \cdot Y} \cdot \frac{C_{p1} \cdot C_{p2}}{(\sqrt{C_{p1}} - \sqrt{C_{p2}})^2} \cdot K, \quad (2),$$

где C_{p1} и C_{p2} – скорости счета в пиках полного поглощения, полученные при обработке спектров, измеренных на расстояниях H_1 и H_2 , σ – чувствительность спектрометра в пике полного поглощения для гамма-квантов данной энергии, Y – квантовый выход гамма-квантов данной энергии, K – поправка на поглощение гамма-квантов в слое толщиной H , определяемая по методу G-фактора.

В таблице 1 представлены определенные из эксперимента значения активности источника, толщины и средней плотности поглощающего слоя, а также «паспортные» значения этих параметров. Видно, что экспериментальные значения параметров хорошо согласуются с истинными их значениями. Следует отметить, что активность источника, толщина и средняя плотность поглотителя были определены при достаточно большой кратности ослабления нерассеянного излучения источника ^{137}Cs , а именно около 30.

При использовании метода G-фактора требуется вычислять площади пиков полного поглощения – во-первых, для расчета величины активности без поправки на поглощение и, во-вторых, для определения самой поправки на поглощение методом G-фактора.

В случае применения HPGe гамма-спектрометра его хорошее энергетическое разрешение обеспечивает возможность достаточно простого определения площадей пиков.

В случае же применения NaI(Tl) сцинтилляционного гамма-спектрометра возникают некоторые сложности. Основными препятствиями в определении площадей пиков в этом случае являются низкое энергетическое разрешение сцинтилляционных спектрометров, его сильная зависимость от энергии, и доминирующая в спектрах непрерывная составляющая. Для устранения этих препятствий в НИЛ ЯФТРК была разработана совокупность математических методов и реализующих их программных средств, позволяющая выполнять преобразования спектров, в результате которых ширина спектральных пиков существенно (в 2 – 3 раза) уменьшается. При этом оценка погрешности площади пика, а также величин, определяемых на основе площади пика, производится обычными статистическими методами [3].

На рисунке 3 приведен пример такой обработки сцинтилляционного спектра, полученного при *In situ* измерениях на NaI(Tl) сцинтилляционном спектрометре с разрешением 7% для гамма-излучения 661.6 кэВ радионуклида ^{137}Cs . На рисунках 4 и 5 представлены результаты такой же обработки спектров гамма-излучения источника $^{60}\text{Co} + ^{22}\text{Na}$, измеренного NaI(Tl) сцинтилляционным спектрометром с разрешением 7% и CsI(Na) сцинтилляционным спектрометром с разрешением 5.7% для гамма-излучения 661.6 кэВ радионуклида ^{137}Cs .

Видно, что метод «улучшения» энергетического разрешения позволяет определять площади пиков в достаточно проблемных спектрах и создает тем самым возможность практического эффективного применения относительно недорогих и удобных в эксплуатации сцинтилляционных детекторов для идентификации и определения активности источников гамма-излучения.

Сказанное иллюстрируется результатами экспериментов, в которых с помощью NaI(Tl) гамма-спектрометра определялась активность точечных источников гамма-излучения, имеющими достаточно сложный радионуклидный состав. В качестве поглотителей использовались вода и песок. В таблицах 2 – 5 представлены определенные из эксперимента с помощью методов G-фактора и «улучшения» энергетического разрешения значения активности источников, толщины и средней плотности поглощающих слоев, а также «паспортные» значения этих параметров. Видно, что экспериментальные значения параметров достаточно хорошо согласуются с истинными их значениями.

Таким образом, разработанный метод G-фактора позволяет в практических измерениях с помощью NaI(Tl) сцинтилляционных и HPGe гамма-спектрометров определять активность гамма-излучающего вещества, находящегося за поглотителем с априорно неизвестными характеристиками.

Вычисление коэффициента ослабления методом G-фактора по NaI(Tl) гамма-спектрам с «улучшением» энергетического разрешения реализовано в программе «SAS Na *In Situ*», а по HPGe гамма-спектрам – в программе «SAS Ge *In Situ*», разработанных в НИЛ ЯФТРК.

С учетом уже имеющихся результатов **лабораторных и полевых экспериментов** использование созданного метода **G-фактора** представляется перспективным для решения следующих задач.

1. Проведение комплексного инженерно-радиационного обследования объектов при подготовке к выводу из эксплуатации.

- Оценка загрязнения строительных конструкций, крупного технологического оборудования, участков местности.

- Оценка объема и характеристик РАО, образующихся при демонтаже конструкции и оборудования.
 - Контроль дезактивационных и реабилитационных мероприятий.
2. Определение характеристик радиоактивного загрязнения местности.
 - Для планирования реабилитационных мероприятий и контроля их проведения, определения объема и характеристик образующихся при реабилитации РАО.
 - Оперативное исследование загрязненной местности в рамках ликвидации последствий радиационных аварий.
 3. *In situ* беспробоотборный контроль состояния и определение характеристик приповерхностных могильников РАО, в т.ч. с «забытой» историей.
 4. Обращение с РАО различного происхождения.
 - *In situ* сортировка и категоризация неупакованных в контейнеры РАО.
 - Паспортизация радиоактивных веществ и отходов с «забытой» историей.
 - Паспортизация РАО различного происхождения, упакованных в стандартные и произвольные контейнеры.
 5. Беспробоотборные гамма-спектрометрические исследования характеристик источников с существенным самопоглощением: отработанное ядерное топливо, бассейны хранения и т.д.
 6. Радиационно-экологический и технологический контроль на АЭС.
 - Оценка активности отложений гамма-излучающих радионуклидов на внутренних поверхностях технологического оборудования.
 - Определение характеристик и состояния различных объектов контроля: приповерхностные могильники, поля фильтрации, локальные загрязнения местности, в т.ч. участки дна водоемов, контрольные точки и т.д.
 - Обращение с РАО различного происхождения.
 7. Технологии пассивного неразрушающего анализа ядерных материалов и различных изделий из них.

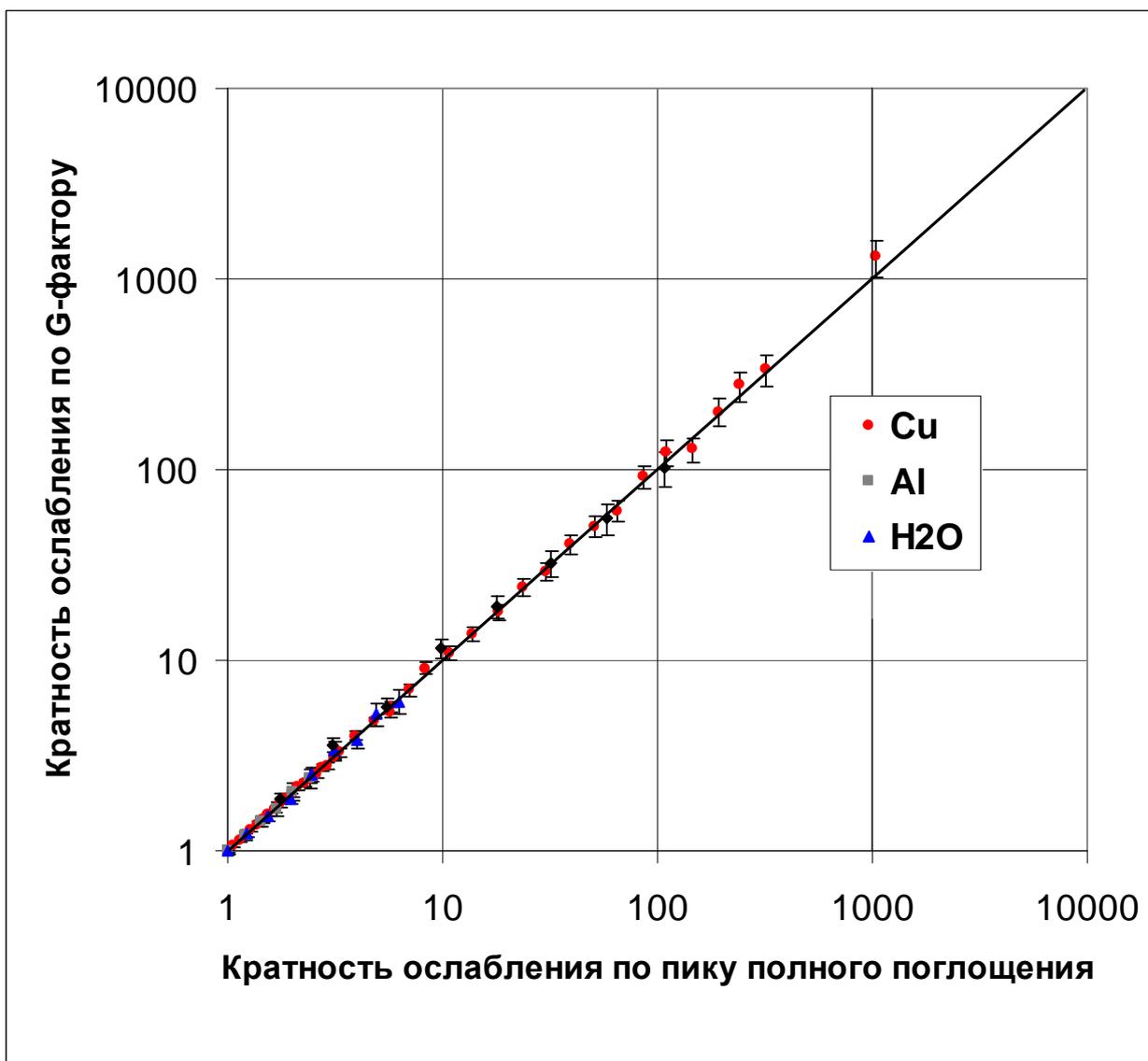


Рис. 1. Сравнение результатов определения коэффициентов ослабления гамма-излучения радионуклида ^{137}Cs . Погрешности на уровне 2σ .

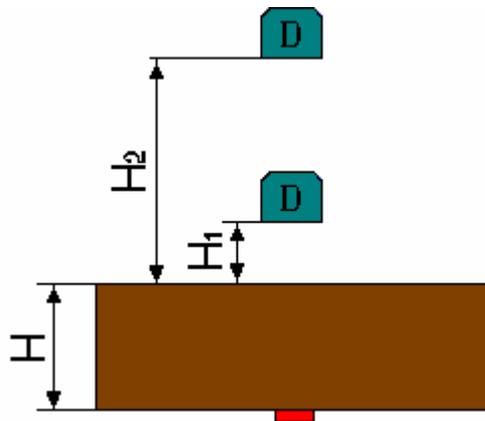


Рис. 2. Схема эксперимента по определению активности находящегося за поглотителем источника ^{137}Cs и характеристик самого поглотителя.

Таблица 1.
Результаты определения активности источника ^{137}Cs и параметров поглотителя.

Параметр	«Паспортное» значение параметра	Экспериментальное значение параметра
Активность источника Q, МБк	8.94 ± 0.35	9.3 ± 0.6 (0.34 ± 0.01 – без поправки на поглощение)
Толщина поглощающего слоя H, см	30.0 ± 0.5	29.7 ± 1.2
Средняя плотность поглощающего слоя ρ , г/см ³	1.48 ± 0.04	1.44 ± 0.06

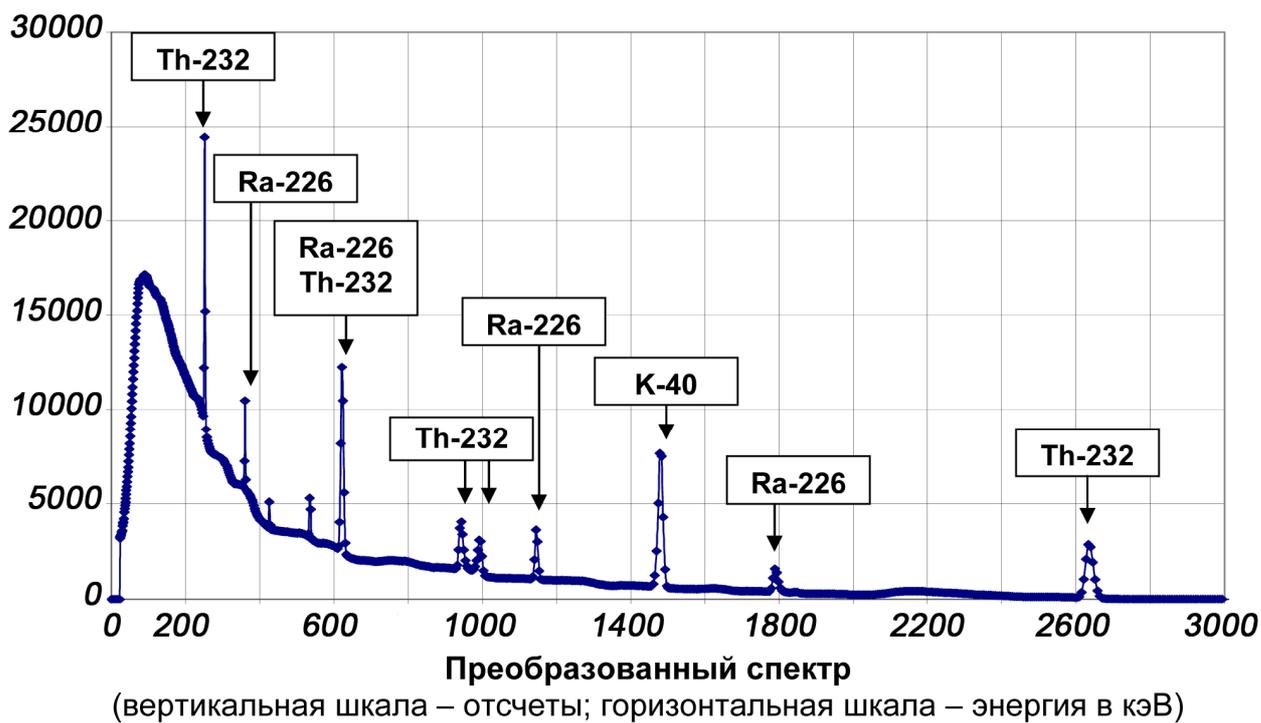


Рис. 3. Пример улучшения *In situ* NaI(Tl) сцинтилляционного спектра.

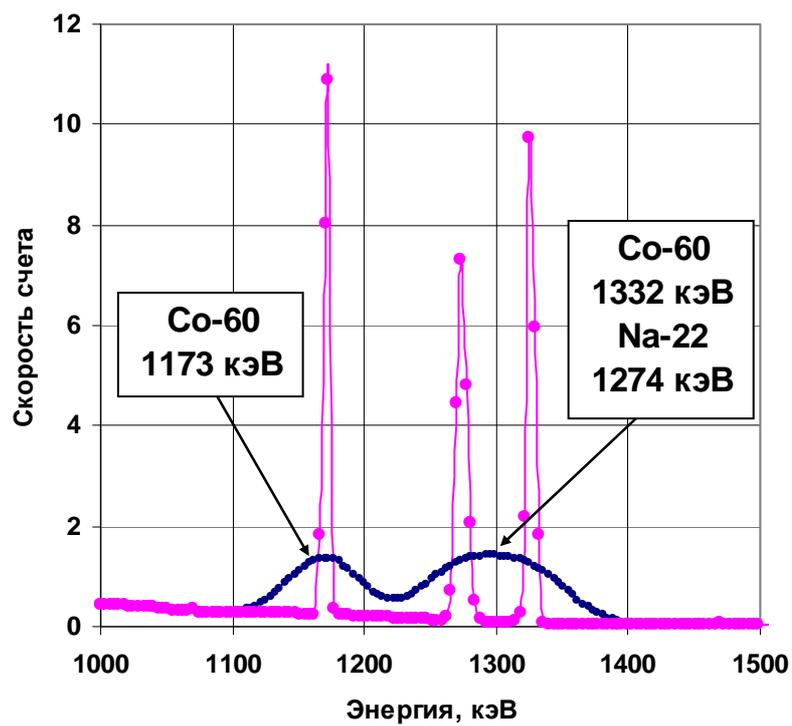


Рис. 4. Сравнение исходного и улучшенного спектров источника $^{60}\text{Co} + ^{22}\text{Na}$. Исходный спектр измерен NaI(Tl) сцинтилляционным спектрометром с разрешением 7% для гамма-излучения 661.6 кэВ радионуклида ^{137}Cs .

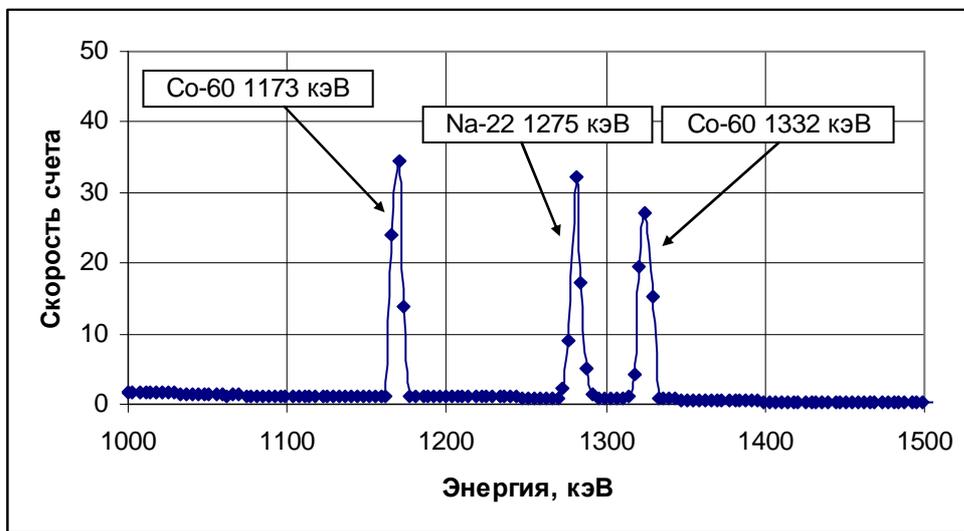
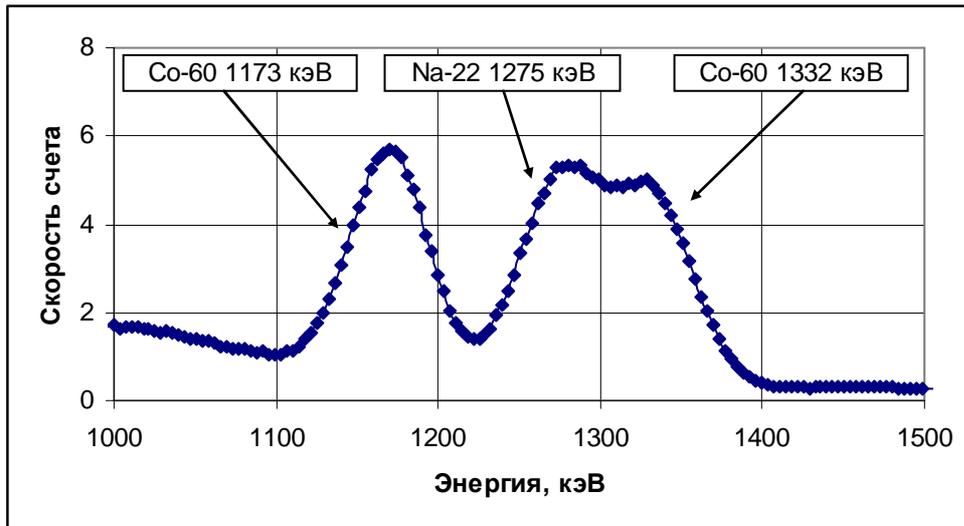


Рис. 5. Сравнение исходного и улучшенного спектров источника $^{60}\text{Co} + ^{22}\text{Na}$. Исходный спектр измерен $\text{CsI}(\text{NaI})$ сцинтилляционным спектрометром с разрешением 5.7% для гамма-излучения 661.6 кэВ радионуклида ^{137}Cs .

Таблица 2.

Результаты определения активности источника $^{152}\text{Eu} + ^{60}\text{Co} + ^{137}\text{Cs} + ^{94}\text{Nb}$ и параметров слоя поглотителя – воды.

Параметр		«Паспортное» значение параметра	Экспериментальное значение параметра
Активность Q, кБк	^{152}Eu	22.46 ± 0.23	21.2 ± 3.2
	^{60}Co	4.29 ± 0.24	4.1 ± 0.6
	^{137}Cs	16.38 ± 0.34	18.0 ± 2.7
	^{94}Nb	7.70 ± 0.35	8.4 ± 1.4
Толщина поглощающего слоя воды H, см		11.0 ± 0.5	11.7 ± 1.1
Средняя плотность поглощающего слоя воды ρ , г/см ³		1.0	1.1 ± 0.5

Таблица 3.

Результаты определения активности источника $^{152}\text{Eu} + ^{60}\text{Co} + ^{137}\text{Cs} + ^{94}\text{Nb}$ и параметров слоя поглотителя – песка.

Параметр		«Паспортное» значение параметра	Экспериментальное значение параметра
Активность Q, кБк	^{152}Eu	22.46 ± 0.23	21.9 ± 3.6
	^{60}Co	4.29 ± 0.24	3.2 ± 0.5
	^{137}Cs	16.38 ± 0.34	16.4 ± 2.7
	^{94}Nb	7.70 ± 0.35	8.2 ± 1.6
Толщина поглощающего слоя песка H, см		10.0 ± 0.5	10.4 ± 1.3
Средняя плотность поглощающего слоя песка ρ , г/см ³		1.5 ± 0.1	1.6 ± 0.7

Таблица 4.

Результаты определения активности источника $^{137}\text{Cs} + ^{152}\text{Eu} + ^{44}\text{Ti} + ^{207}\text{Bi}$ и параметров слоя поглотителя – воды.

Параметр		«Паспортное» значение параметра	Экспериментальное значение параметра
Активность Q, кБк	^{137}Cs	120 ± 3.6	108 ± 15
	^{152}Eu	170 ± 5.1	180 ± 24
	^{44}Ti	50.0 ± 1.5	68 ± 13
	^{207}Bi	38 ± 1.1	42 ± 6
Толщина поглощающего слоя воды H, см		15.0 ± 0.5	16.9 ± 1.3
Средняя плотность поглощающего слоя воды ρ , г/см ³		1.0	1.1 ± 0.8

Таблица 5.

Результаты определения активности источника $^{137}\text{Cs} + ^{152}\text{Eu} + ^{44}\text{Ti} + ^{207}\text{Bi}$ и параметров слоя поглотителя – песка.

Параметр		«Паспортное» значение параметра	Экспериментальное значение параметра
Активность Q, кБк	^{137}Cs	120 ± 3.6	114 ± 17
	^{152}Eu	170 ± 5.1	210 ± 30
	^{44}Ti	50.0 ± 1.5	63 ± 9
	^{207}Bi	38 ± 1.1	32 ± 5
Толщина поглощающего слоя песка H, см		15.0 ± 0.5	13.9 ± 1.5
Средняя плотность поглощающего слоя песка ρ , г/см ³		1.0	1.55 ± 0.7

Литература

1. Информационные материалы «CANBERRA».
<http://www.canberra.ru/html/products>
2. Информационные материалы «ORTEC».
<http://www.pribori.com/portal/public/products>
3. Дровников В.В., Егоров М.В. и др. Высокоэффективные аэрогамма-спектрометрические технологии поиска и идентификации техногенных источников гамма-излучения. Спектрометрический анализ и обработка данных на ПЭВМ. Сборник материалов 14 ежегодного семинара в ФГОУ «ГЦИПК» 19-23 ноября 2007 г., стр. 39-52.