Письма в ЖЭТФ, том 124, вып. 1, с. 27 – 30

Зависимость формирования гамма-спектра радионуклида ^{137}Cs от толщины слоя материала: моделирование в GEANT4

В. О. Соловьев[+1)], *А. В. Пучков*[*], *Г. В. Жуков*[×], *Е. Ю. Яковлев*[*]

[+] *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова”, 163002 Архангельск, Россия*

[*] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН, 163020 Архангельск, Россия*

[×] *Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева”, 190005 С.-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 14 мая 2026 г.
После переработки 24 мая 2026 г.
Принята к публикации 25 мая 2026 г.

Методом Монте-Карло (GEANT4) исследована трансформация гамма-спектра ^{137}Cs в образцах из бетона переменной толщины (0.5–10 см) при фиксированной суммарной активности радионуклида. Обнаружено немонотонное поведение интенсивности комптоновской области, обусловленное конкуренцией процессов накопления и ослабления рассеянного излучения. Установлено, что эффективность регистрации излучения в пике полного поглощения достигает максимума при толщине образца 1 см, а отношение сигнал/фон (пик/комптон) монотонно убывает от 0.61 до 0.13. Полученные результаты определяют физические ограничения и оптимальные условия для прямых полевых измерений активности γ-излучающих радионуклидов в строительных материалах и грунтах.

DOI: 10.7868/S3034576626070042

1. Постановка задачи. При гамма-спектрометрии протяженных источников (геологические пробы, строительные материалы) форма спектра и соотношение его компонент зависят от толщины образца и его физико-химических свойств. Для сцинтилляционных детекторов эта зависимость выражена особенно сильно из-за низкого энергетического разрешения, приводящего к перекрытию близко расположенных участков спектра [1]. В настоящей работе на примере бетонных образцов с равномерно распределенным радионуклидом ^{137}Cs исследуется, как толщина образца (при фиксированной суммарной активности) влияет на выход характеристического рентгеновского излучения ^{137m}Ba (энергии 32–36 кэВ), форму и интенсивность комптоновской области (1–527 кэВ), эффективность регистрации фотопика (662 кэВ), отношение импульсов в фотопике к импульсам комптоновского рассеяния как интегральный параметр спектра.

2. Метод. Моделирование выполнено в программном пакете GEANT4. Образец – бетонная плита 500 × 500 мм переменной толщины$(0,5; 1; 2; 5; 10\,\text{см})$. Суммарная активность ^{137}Cs в образце постоянна, удельная активность обратно пропорциональна толщине. Детектор – сцинтилляционный NaI(Tl) $\varnothing\, 63 \times 63$ мм, расстояние от детектора до поверхности образца – 30 см по нормали к центру.

Обработка спектра проводилась по следующим условиям:

∘ Фотопик – площадь в диапазоне 528–880 кэВ с вычетом комптоновской подложки (линейная интерполяция по границам диапазона);

∘ Комптон – полная площадь в диапазоне 1–527 кэВ;

∘ Эффективность регистрации – отношение площади фотопика к суммарной активности образца.

3. Результаты.

3.1. Спектры гамма-излучения при различных толщинах. На рисунке 1 представлены смоделированные гамма-спектры ^{137}Cs для пяти толщин бетонного образца.

Спектры нормированы на суммарную активность образца, что позволяет непосредственно сравнивать их форму. Хорошо видны следующие особенности:

∘ Область < 50 кэВ (характеристическое рентгеновское излучение). При толщине 5 см наблюда-

1)e-mail: vlad.solovev.029@internet.ru

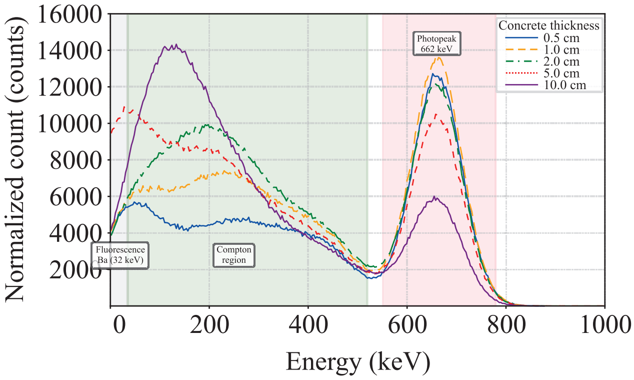

Рис. 1. (Цветной онлайн) Гамма-спектры ^{137}Cs, смоделированные для бетонных образцов толщиной 0.5; 1; 2; 5 и 10 см при фиксированной суммарной активности. По оси абсцисс – энергия гамма-квантов (кэВ), по оси ординат – счет (нормированный). Стрелками отмечены: характеристическое излучение Ba ($\sim$ 32 кэВ), комптоновская область (1–527 кэВ) и фотопик (662 кэВ)

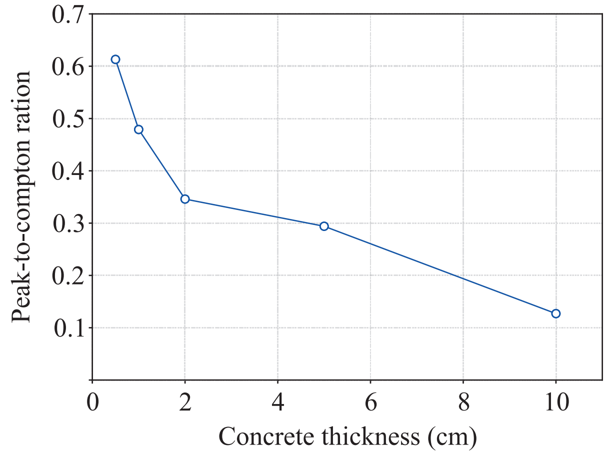

Рис. 2. (Цветной онлайн) Зависимость отношения импульсов фотопика к импульсам комптоновского рассеяния от толщины образца из бетона. По оси абсцисс – толщина (см), по оси ординат – отношение (безразмерное). Точки – результаты расчета, линия – аппроксимация

ется резкое увеличение интенсивности, связанное с оптимальными условиями возбуждения атомов бетона и эмиссии характеристического рентгеновского излучения с последующим его выходом из бетона.

◦ Комптоновская область (1–527 кэВ). Интенсивность немонотонно зависит от толщины: при увеличении толщины она растет (как и увеличение числа актов рассеяния квантов).

◦ Фотопик 662 кэВ. Его интенсивность монотонно убывает с увеличением толщины, что отражает ослабление первичного излучения в бетоне. Однако эффективность регистрации, нормированная на активность, имеет максимум при 1 см (пункт 3.3).

3.2. Отношение пик/комптон. На рисунке 2 приведена зависимость отношения “импульсов в фотопике к импульсам комптоновского рассеяния” от толщины образца. Параметр рассчитан как отношение очищенной площади фотопика (528–880 кэВ) к площади спектра комптоновского рассеяния в диапазоне от 1 до 527 кэВ.

Величина монотонно убывает с толщиной, отражая неуклонное снижение доли первичного (нерассеянного) излучения в общем спектре. Наиболее резкое падение наблюдается в интервале от 5 до 10 см (-57 %), что связано с одновременным сильным ослаблением фотопика и началом увеличения комптоновской области. Полученная зависимость может использоваться как калибровочная для оценки толщины образца неизвестной пробы.

3.3. Эффективность регистрации. На рисунке 3 представлена зависимость эффективности регистрации EFF = (площадь фотопика) / (суммарная активность образца) от толщины бетонной плиты.

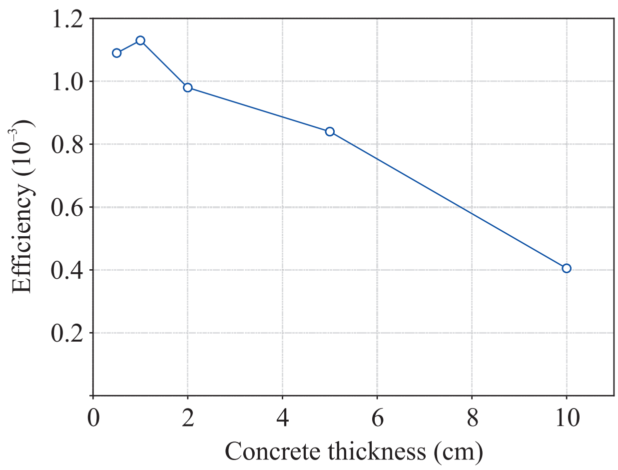

Рис. 3. (Цветной онлайн) Зависимость эффективности регистрации EFF от толщины образца из бетона. По оси абсцисс – толщина (см), по оси ординат – EFF (10^{-3}). Точки – результаты расчета, линия – аппроксимация экспоненциальным спадом после максимума при 1 см

Максимум эффективности достигается при толщине 1 см. При толщине 0.5 см эффективность ниже, так как влияние оказывает геометрический фактор: слишком тонкий образец является “плоским” источником, при котором детектор регистрирует лишь небольшую долю гамма-квантов, испущенных под малыми углами к нормали. При толщинах > 1 см эффективность монотонно падает вследствие самопо-

Таблица 1. Характер формирования разных участков гамма-спектра ^{137}Cs

Spectral region	Energy	Thickness dependence behavior	Physical cause
Characteristic X-ray emission of ^{137m}Ba	< 50 keV	Maximum at 5 cm (Fig. 1)	Optimal excitation of fluorescence by 662 keV gamma quanta
Compton region	1–200 keV	Increases up to 5–10 cm (Fig. 1)	Accumulation of scattered radiation
Compton region	200–527 keV	Maximum at 2–3 cm (Fig. 1)	Small-angle scattering; equilibrium reached faster
Photopeak efficiency	662 keV	Maximum at 1 cm (Fig. 3)	Balance of specific activity, geometry, and self-absorption

глощения квантов в образце. Спад эффективности в диапазоне толщин от 1 до 10 см хорошо аппроксимируется экспонентой с эффективным коэффициентом ослабления $\mu \approx 0.1\,\text{см}^{-1}$, что соответствует литературным данным для ^{137}Cs в бетоне.

4. Обсуждения. Полученные результаты демонстрируют различный характер формирования разных участков гамма-спектра ^{137}Cs при изменении толщины объемного источника с фиксированной суммарной активностью (табл. 1).

Полученные в работе закономерности имеют прямое практическое значение для полевой гамма-спектрометрии при измерении активности объемных источников – таких как участки грунта, горные породы, строительные конструкции, отвалы горной породы или поверхности перекрытий. В полевых условиях использование сцинтилляционных детекторов (NaI(Tl) или их аналогов) является стандартным подходом в силу их портативности, высокой эффективности и устойчивости к внешним воздействиям [2, 3]. Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы для практики полевых измерений:

1. Оптимизация геометрии измерений. Показано, что эффективность регистрации достигает максимума при толщине активного слоя бетона около 1 см. Это означает, что при измерениях на местности (например, при оценке активности горизонта почвы или снежного покрова) основная регистрируемая эмиссия гамма-квантов будет поступать из поверхностного слоя толщиной порядка 1–2 см. Более глубокие слои вносят заметно меньший вклад из-за самопоглощения, что необходимо учитывать при пересчете измеренной активности на объем пробы.

2. Оценка активности по полевому спектру. Поскольку отношение импульсов фотопика к импульсам комптоновского рассеяния монотонно зависит от толщины активного слоя, этот параметр может использоваться для оценки эффективной глубины, с которой регистрируется излучение, или для оценки степени однородности распределения радионуклида в грунте. В полевых условиях, где бурение и отбор проб затруднены, спектральный параметр отношения импульсов фотопика к импульсам комптоновского рассеяния может служить оперативным критерием для принятия решения.

3. Калибровка полевых дозиметров. Полученная зависимость эффективности от толщины позволяет корректировать результаты полевых измерений при переходе от точечных калибровочных источников к реальным объемным распределениям активности. Это повышает точность определения активности радионуклидов в грунтах, строительных материалах и техногенных отложениях без необходимости отбора проб и последующего лабораторного анализа.

4. Разделение вкладов поверхностного и глубинного загрязнения. Характерная разница в поведении низкоэнергетической (характеристическое излучение ^{137}mBa) и высокоэнергетической (фотопик 662 кэВ) частей спектра может быть использована для оценки глубины залегания радиоактивного загрязнения в полевых условиях. При загрязнении только поверхности будет наблюдаться усиленный выход мягкой компоненты; при загрязнении всего объема – преобладание фотопика и определенное соотношение импульсов фотопика к импульсам комптоновского рассеяния.

Таким образом, результаты работы создают основу для развития методов прямой полевой гамма-спектрометрии с использованием портативных сцинтилляционных детекторов, позволяющих без отбора проб оценивать активность γ-излучающих радионуклидов в естественных условиях залегания.

5. Заключение. Методом Монте-Карло показано, что толщина образца из бетона с равномерно распределенным ^{137}Cs (суммарная активность постоянна) существенно влияет на форму гамма-спектра, причем характер этого влияния различен для разных энергетических диапазонов. Обнаружены максимум выхода характеристического излучения ^{137}mBa при

5 см; увеличение накопления рассеянного излучения совместно с увеличением толщины образца; максимум эффективности регистрации фотопика при 1 см; монотонное падение отношения импульсов фотопика к импульсам комптоновского рассеяния во всем диапазоне толщин (0.5–10 см).

Представленные зависимости эффективности и отношения импульсов фотопика к импульсам комптоновского рассеяния от толщины образца создают основу для калибровки портативных сцинтилляционных детекторов при полевых измерениях активности гамма- излучающих радионуклидов в грунтах, горных породах и строительных конструкциях, исключая процедуру отбора проб. Полученные результаты имеют значение для правильной интерпретации сцинтилляционных гамма-спектров объемных источников и определения их активностей.

Финансирование работы. Исследование выполнено в рамках темы фундаментальных научных исследований и разработок # FUUW-2025-0011 "Особенности миграции элементов и их изотопов в компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений" (номер госрегистрации 125022002727-2).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. D. Reilly, N. Ensslin, and H. Smith, Jr. (editors), *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials* (Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1991), p. 700.
2. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako et al. (Collaboration), "GEANT4 – a simulation toolkit", Nucl. Instr. Meth. A **506**, 250 (2003).
3. G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", 4th ed. (Wiley, N.Y., 2010).