

вации достигнут при обработке смесью $4\text{M H}_2\text{SO}_4 + 1\text{M H}_3\text{PO}_4$ при соотношении жидкой и твердой фазы 2/1. Удельная активности ^{137}Cs при этом составила $0,16 \pm 0,04$ кБк/кг, что в 3,5 раза ниже допустимой нормами для населения [2]. Погрешность определения активности ^{137}Cs после четвертого этапа обработки слишком велика, чтобы можно было оценить эффективность использования фосфорной кислоты. Анализ коэффициентов дезактивации для второго этапа в табл. 1, 2 показывает, что замена 1М серной кислоты на 1М фосфорной подтверждает указанное преимущество использования смеси кислот. Следует отметить, что стоимость фосфорной кислоты по сравнению с серной в 2 раза выше.

Потери массы грунта при обработке смесью кислот также не отличаются от потерь при обработке серной кислотой — $4,7 \pm 0,4\%$ массы исходного грунта составляет мелкодисперсная фракция, отправленная в хранилище после третьего этапа реагентной обработки, $2,4 \pm 0,3\%$ растворилось в реагенте на втором этапе, $0,8 \pm 0,3\%$ — на четвертом этапе. Полные потери на растворение при реагентной обработке составили $3,2 \pm 0,4\%$, в хранилище направлено 25—30% исходного грунта.

Дезактивация песчаного грунта с 4 раза большей исходной удельной активностью 2М H_2SO_4 и смесью 2М $\text{H}_2\text{SO}_4 + 1\text{M H}_3\text{PO}_4$ в качестве реагентов не позволила за четыре этапа обработки достичь удельной активности, соответствующей нормам для населения, поэтому был проведен пятый этап, идентичный четвертому

(см. табл. 3). Но даже в этом случае требуемую удельную активность в пределах погрешности удалось получить лишь при реагентной обработке смесью кислот. При этом потери на растворение при реагентной обработке на втором, четвертом, пятом этапах составили $3,3 \pm 1,1$, $0,7 \pm 1,1$, $1,1 \pm 0,1\%$ соответственно, полные потери на растворение — $5,1 \pm 1,1\%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Иванов О.П. и др. Дезактивация радиоактивно загрязненного грунта в РНЦ «Курчатовский институт». — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 6, с. 381—387.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М., Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Госпотребнадзора, 2009. 100 с.
3. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. Т. 1. Физические основы защиты от излучений. М.: Атомиздат, 1980. 462 с.
4. Дмитриев С.А., Баринов А.С., Купцов В.М. Способ очистки грунтов от радионуклидов. Патент RU 2 388 084, 2008. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2009, № 12, ч. 4, с. 1009.
5. Чаповский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М.: Недра, 1975. 304 с.
6. Дмитриев С.А., Прозоров Л.Б., Купцов В.М. Способ очистки грунтов от радионуклидов цезия. Патент RU 2 361 301, 2007. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2009, № 19, ч. 3, с. 812.
7. Дмитриев С.А., Николаевский В.Б., Прозоров Л.Б., Щеглов М.Ю. Способ очистки грунтов от радионуклидов цезия. Патент RU 2 274 915. — Там же, 2006, № 11, ч. 2, с. 525.

Поступила в Редакцию 22.12.2010

УДК 621.039

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОРТАТИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Ромоданов В.Л., Сахаров В.К., Черникова Д.Н. (НИЯУ МИФИ, г. Москва),
Рыжков В.И., Хасаев Т.О., Сладков А.А. (ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова, г. Москва)

Нейтронные генераторы как источники интенсивного нейтронного излучения в настоящее время широко используются в различных областях науки и техники. Производство портативных импульсных нейтронных генераторов в еще большей степени расширяет диапазон их применения. Принято считать, что генераторы испускают нейтроны в узком энергетическом диапа-

зоне вблизи энергии 2,5 и 14,7 МэВ в зависимости от реакции их получения (D, D) или (D, T) и изотропно из точки падения дейтронного пучка на мишень. Однако мишень любого генератора окружена разными конструкционными материалами, проходя через которые нейтроны мишени могут как рассеиваться, так и поглощаться. Это приводит к изменению углового и энергетиче-

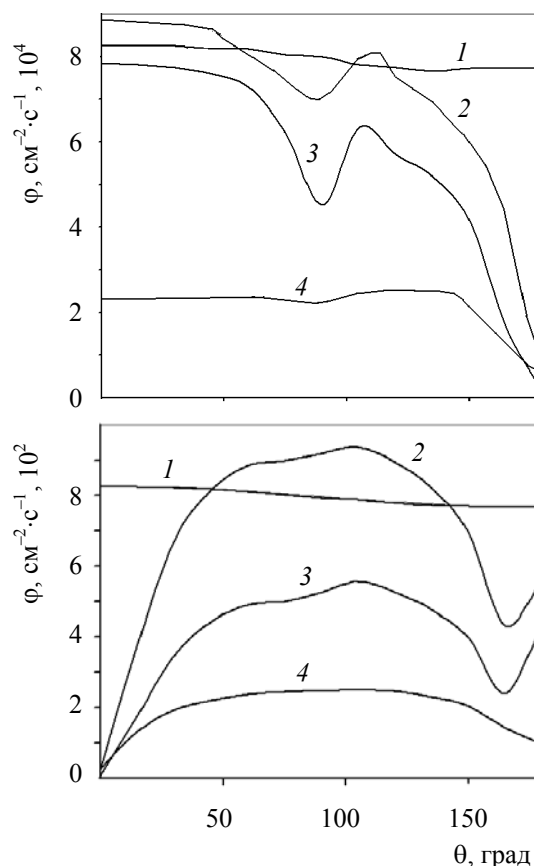
ского распределения нейтронов и образованию сопутствующего фотонного излучения, что сопровождается изменением формы импульса нейтронов и фотонов.

В настоящей работе исследовано влияние конструкционных материалов портативных нейтронных генераторов типа ИНГ-031, -06, выпускаемых ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова, на характеристики поля нейтронов и фотонов вблизи них. Временное энергетическое распределение плотности потока нейтронов и вторичных фотонов рассчитывали в реальной трехмерной геометрии методом Монте-Карло по программе MCNP-4c2 с учетом разных материалов конструкции вблизи мишени, включая масло, керамику, сталь, стеклотекстолит и др. [1].

Тритиевые мишени с соотношением ядер трития к титану 1,5 в виде диска радиусом 3,1 см в генераторе ИНГ-031 и 0,5 см в ИНГ-06 облучаются пучком дейтронов энергией 95 и 85 кэВ соответственно. Направление пучка дейтронов совпадает с осью генератора и перпендикулярно плоскости мишени. Угловое по азимуту (угол θ) и энергетическое распределение испускаемых мишенью нейтронов для программы MCNP получено путем предварительных кинематических расчетов для точечной мишени, при этом распределение по полярному углу принималось равновероятным в диапазоне $0-180^\circ$. Выход нейтронов с поверхности мишени считался равномерным и равным одному нейтрону со всей поверхности. На рис. 1 результаты перенормированы на реальный выход генераторов.

Энергетическое временное распределение плотности потока нейтронов и вторичных фотонов вычисляли на основе локальной оценки потока в разных точках, расположенных в воздухе на расстоянии 1 м от центра мишени под разным углом θ относительно направления первичного пучка дейтронов. В стационарном режиме работы генератора расчеты выполняли в диапазоне $0-180^\circ$ с шагом 15° , в импульсном — $0, 90, 180^\circ$. В расчетах использовали библиотеку констант ENDF/BVI.6.

Спектр нейтронов в диапазоне энергии от тепловой до 15 МэВ разбивали на отдельные энергетические группы, специально выделяя нейтроны, энергия которых соответствует испускаемым мишенью генератора (13–15 МэВ), и замедленные на конструкционных элементах: быстрые энергией ниже энергии нейтронов ми-



Р и с. 1. Плотность потока нейтронов чистой мишени без конструкционных материалов (1), суммарная плотность потока нейтронов (2), нерассеянных нейтронов (3), вторичных фотонов в воздухе при наличии конструкционных материалов (4) на расстоянии 1 м от центра мишени ИНГ-031 с выходом 10^{10} с^{-1} (а) и ИНГ-06 с выходом 10^8 с^{-1} (б) в точках, расположенных под разным углом θ относительно направления пучка дейтронов

шени (1–13 МэВ), промежуточные энергией от 0,46 эВ до 1 МэВ и тепловые — ниже 0,46 эВ. Статистическая погрешность результатов расчетов для нейтронов и фотонов в основном не превышала 3 и 5% соответственно.

Влияние конструкционных материалов на распределение нейтронов и фотонов оценивали путем сравнения результатов, полученных при их наличии и отсутствии в нейтронном генераторе как в стационарном, так и импульсном режиме работы. Активацию материалов нейтронного генератора не учитывали.

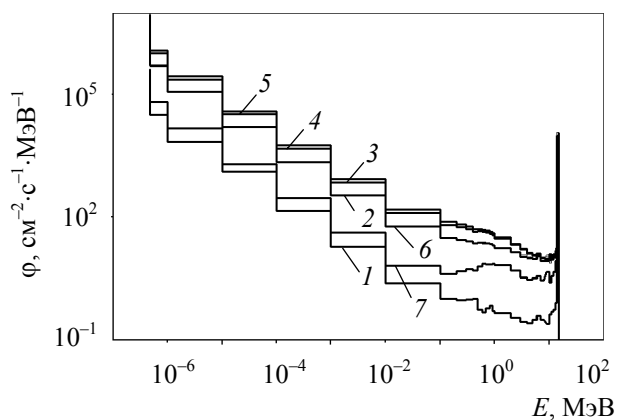
Анализ углового распределения плотности потоков нейтронов разных энергетических групп и фотонов (см. рис. 1) показывает, что близкое к изотропному угловое распределение плотности потока нейтронов мишени при отсутствии конструкционных элементов (данные кинематического расчета совпадают с результатами расчетов методом Монте-Карло) переходит

при угле выше 135° для обоих генераторов и менее 45° для ИНГ-06 в сугубо анизотропное за счет поглощения и рассеяния нейтронов мишени на конструкционных элементах. Разница в угловом распределении излучения для разных генераторов обусловлена разным расположением тритиевых мишеней и материалов конструкций.

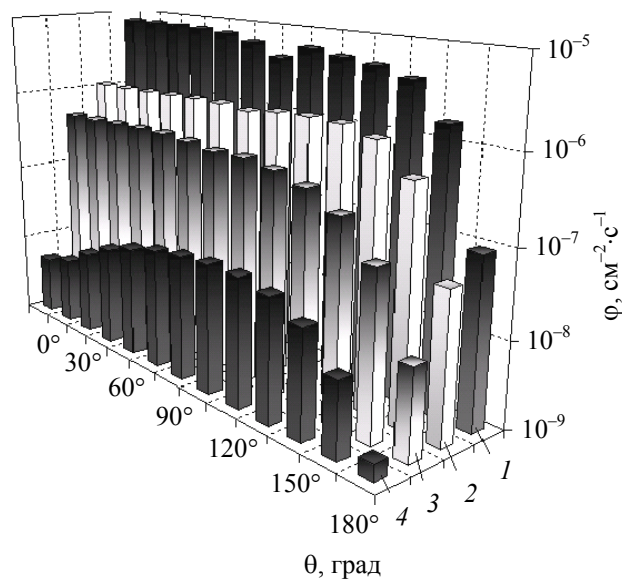
Анализ показал, что близкие к моноэнергетическим для данного угла чистой мишени спектры нейтронов, рассчитанные при наличии конструкционных элементов, уширяются при реальной конструкции, особенно под большим углом и характеризуются появлением нейтронов, энергия которых ниже энергии вылетающих из мишени (рис. 2). Соотношение между отдельными энергетическими группами нейтронов в спектрах наглядно иллюстрирует рис. 3 — при преобладающем вкладе нейтронов мишени доля замедленных составляет несколько процентов. Характерно появление вторичного фотонного излучения как результата взаимодействия нейтронов с конструкционными элементами генератора (рис. 4). Спектр вторичных фотонов охватывает широкий энергетический диапазон до 8 МэВ.

Таким образом, анализ показывает, что конструкционные элементы при стационарном режиме работы генератора существенно искажают как угловые, так и спектральные характеристики излучения и эти искажения зависят от местоположения конструкционных элементов относительно мишени и типа генератора.

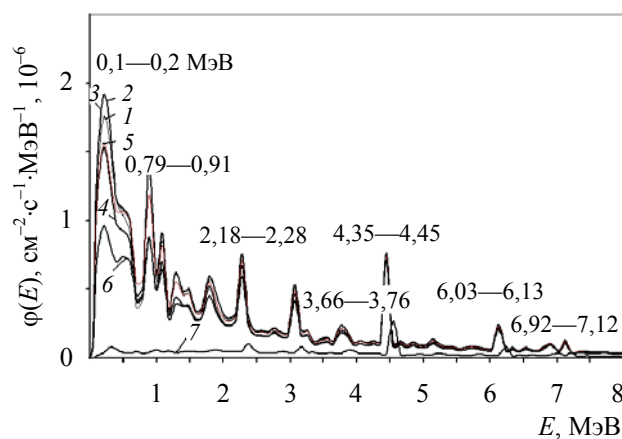
При импульсном режиме генератора важное значение приобретает форма импульса, искажаемая конструкционными элементами. При мгновенном импульсе выходящих из мишени



Р и с. 2. Спектр нейтронов в воздухе на расстоянии 1 м от центра мишени ИНГ-06 в точках, расположенных под углом 0 (1), 30 (2), 60 (3), 90 (4), 120 (5), 150 (6), 180° (7) относительно направления пучка дейтронов



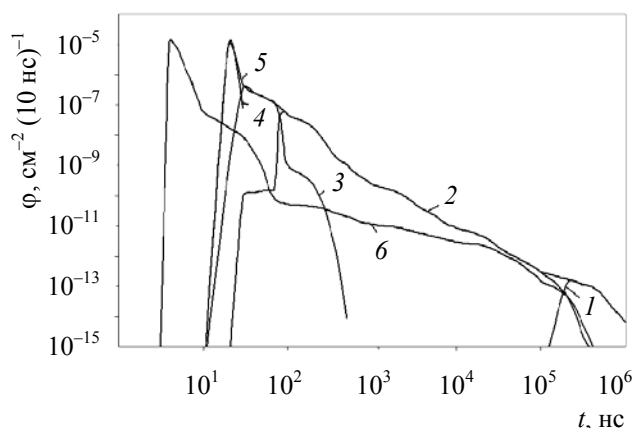
Р и с. 3. Вклад нейтронов энергией 13–15 МэВ (1), 1–13 МэВ (2), 0,46 эВ – 1 МэВ (3), <0,46 эВ (4) в спектр в рассматриваемых точках детектирования для реальной конструкции ИНГ-06



Р и с. 4. Спектр вторичных фотонов, создаваемый в воздухе на расстоянии 1 м от мишени ИНГ-31 под углом 0 (1), 30 (2), 60 (3), 90 (4), 120 (5), 150 (6), 180° (7) относительно пучка дейтронов с учетом конструкционных элементов

нейтронов (при $t = 0$) длительность реального импульса генератора увеличится в результате взаимодействия нейтронов мишени с конструкционными элементами. Форму импульса генератора с учетом конструкционных элементов исследовали на основе анализа временного распределения плотности потоков нейтронов разной энергией и фотонов по аналогии с описанной методикой для стационарного режима.

Из приведенного на рис. 5 временного распределения видно, что нейтроны, испускаемые мишенью ИНГ-031, достигают точки регистрации примерно через 20 нс, их мгновенный импульс заканчивается через примерно 10 нс. Эти параметры не зависят от положения точки ре-

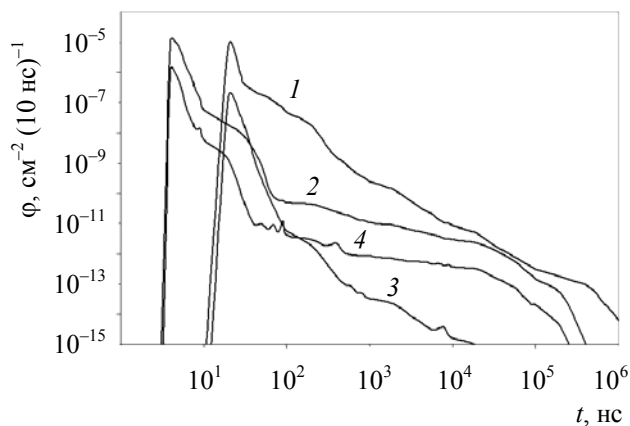


Р и с. 5. Временное распределение плотности потока нейтронов энергией <0,46 эВ (1), 0,46 эВ — 1 МэВ (2), 1—13 МэВ (3), 13—15 МэВ (4), <15 МэВ (5) и вторичных фотонов (6) в воздухе на расстоянии 1 м от центра мишени ИНГ-031 вдоль пучка дейтронов при мгновенном импульсе 1 нейтрон ($t = 0$)

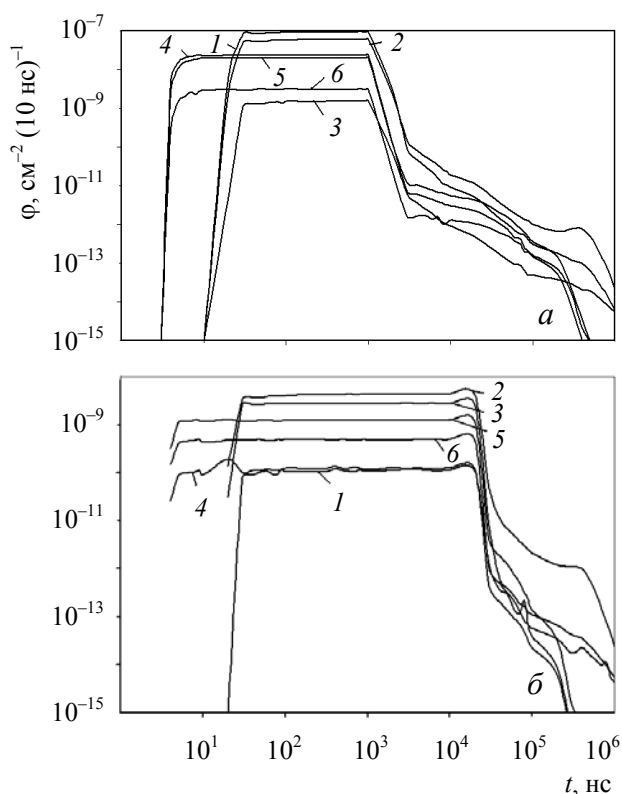
гистрации, но абсолютная амплитуда импульса максимальна в направлении пучка дейтронов, в перпендикулярном ему направлении она уменьшается примерно в 2 раза и почти в 200 раз в противоположном пучку направлении. Быстрые нейтроны энергией 1—13 МэВ, образующиеся в результате рассеяния на конструкционных элементах, приходят в точку детектирования тоже примерно через 20 нс, но длительность их импульса простирается примерно до 200—300 нс, что почти в 10 раз выше длительности импульса нейтронов мишени. Максимальная амплитуда импульса, наблюдаемая при 30 нс, зависит от точки регистрации и в 1,5—20 раз ниже амплитуды нейтронов мишени. На импульс быстрых нейтронов при длительности выше примерно 70 нс накладывается импульс промежуточных нейтронов, длительность которого составляет уже 200—300 мкс, что во много раз превышает длительность импульса быстрых нейтронов. Правда, его максимальная амплитуда в 100—500 раз ниже амплитуды импульса быстрых нейтронов. Через 50—100 мкс в точки детектирования поступают тепловые нейтроны, пологий импульс которых, достигая максимума при 100—300 мкс, простирается до времени примерно 1 мс. Его амплитуда в 10^7 — 10^8 раз ниже амплитуды импульса быстрых нейтронов, но в этот момент времени нейтронов другой энергией нет. Интегральный по времени вклад тепловых нейтронов в полную плотность потока нейтронов всего в 100—1000 раз ниже вклада быстрых нейтронов мишени.

Импульс фотонов появляется в точках регистрации раньше нейтронного (примерно после 3 нс после импульса на мишени) и обусловлен фотонами неупругого рассеяния нейтронов мишени на прилегающих к мишени конструкционных элементах. Фотоны, образовавшиеся при первых столкновениях нейтронов мишени, приходят в точки регистрации, опережая нейтроны. Максимальная амплитуда фотонного импульса при угле 0 и 90° примерно совпадает с максимальной амплитудой нейтронного, при угле 180° он почти в 10 раз выше. Временной спад фотонного импульса в диапазоне 0,1—100 мкс значительно слабее по сравнению с нейтронным. Наблюдаемые закономерности объясняются конструкцией ИНГ-031. Иной вид по абсолютным значениям имеют временные зависимости для ИНГ-06, хотя общие закономерности сохраняются и для этого генератора (рис. 6). В итоге влияние конструкционных материалов на форму импульса портативного нейтронного генератора сводится к увеличению длительности нейтронного импульса с 10 нс на чистой мишени до 1000 мкс за счет замедленных на конструкционных элементах нейтронов и появлению мощного и длительного импульса вторичных фотонов.

Реальный импульс нейтронов на мишени портативных генераторов без учета конструкционных элементов не является мгновенным, для ИНГ-031 его длительность составляет 1 мкс, для ИНГ-06 — 20 мкс. Предполагалось также, что выход нейтронов в течение импульса постоянен. По описанной методике было рассчитано временное распределение плотности потока нейтронов и вторичных фотонов в воздухе на рас-



Р и с. 6. Временное распределение плотности потока нейтронов (1, 3) и вторичных фотонов (2, 4) в воздухе на расстоянии 1 м от центра мишени ИНГ-031 и ИНГ-06 соответственно в направлении пучка дейтронов при мгновенном импульсе 1 нейтрон ($t = 0$)



Р и с. 7. Временное распределение плотности потока нейтронов (1, 2, 3) и вторичных фотонов (4, 5, 6) в воздухе на расстоянии 1 м от центра мишени ИНГ-031 (а) и ИНГ-06 (б) в направлении пучка дейтронов в перпендикулярном и противоположном направлении соответственно при реальной длительности импульса 1 нейтрон

стоянии 1 м от мишени ИНГ-031, -06 в точках, расположенных под разным углом относительно пучка дейтронов, с учетом как конструкционных материалов, так и реальной длительности импульса на мишени генераторов. Приведенные на рис. 7 результаты расчетов показали, что и для мгновенного импульса при реальной длительности наблюдается значительное изменение как углового, так и энергетического распределения нейтронов. Форма импульса искажается, значительно увеличивается его длительность. Существенный вклад вносит сопутствующее фотонное излучение.

Выявленные закономерности формирования излучения для реальной конструкции нейтронного генератора необходимо учитывать при решении практических задач. К их числу можно отнести обнаружение водородсодержащих материалов по наличию тепловых нейтронов после импульса нейтронного генератора, контроль состава делящихся материалов с использованием быстрых нейтронов, организацию стартовых импульсов во времяпролетных методах с помощью сцинтилляционных систем.

Поступила в Редакцию 16.11.10

УДК 614.876

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОНОВОГО СПЕКТРА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АЭРОГАММАСЪЕМКИ

Богатов С.А., Шведов А.М. (ИБРАЭ, г. Москва)

Одним из основных составляющих, определяющих минимально обнаруживаемую активность и точность идентификации техногенных радиоактивных источников и загрязнений при аэрогаммасъемке, является фоновое излучение, включающее в себя излучение естественных радионуклидов, остаточный фон спектрометра и космическое излучение. Вклад излучения естественных радионуклидов — ^{40}K и дочерних продуктов распада ^{238}U и ^{232}Th является преобладающим. При этом изменение рельефа местности, содержания естественных радионуклидов в почве и воздухе, наличие застройки приводят к существенным вариациям спектра фонового излучения, затрудняющим обнаружение техноген-

ного излучения, особенно при отсутствии явно выделяющихся в измеряемом спектре пиков полного поглощения.

В основу разработанного метода восстановления фонового спектра, обусловленного излучением естественных радионуклидов, положены расчет функций отклика детектора на излучение ^{40}K , дочерних продуктов распада ^{238}U и ^{232}Th и оптимизация их вклада в суммарный спектр методом наименьших квадратов. Вклад излучения естественных радионуклидов оценивается по скорости счета в нескольких энергетических окнах высокоэнергетической части спектра, где излучение техногенных нуклидов, как правило, отсутствует. Вклад в измеряемый спектр косми-