
СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 539.1.074.3 + 519.254

СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ ГАММА-ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ В ЛЕГКИХ ВЗРОСЛОГО ЧЕЛОВЕКА. ЧАСТЬ 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СКГ-АТ1316А

*Жуковский А.И.¹, Толкачев А.Н.¹, Коновалов Е.А.¹, Гузов В.Д.¹, Хрущинский А.А.²,
Кутень С.А.², Чудаков В.А.³.*

¹ УП «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь

² НИИ ядерных проблем БГУ, г. Минск, Республика Беларусь

³ Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова,
г. Минск, Республика Беларусь

Представлено описание устройства детектирования спектрометра излучения человека СКГ-АТ1316А. Приведено краткое описание математических методов обработки аппаратурных спектров. Показаны основные преимущества использования предлагаемых функциональных зависимостей. (E-mail: alexzhukovski@gmail.com)

Ключевые слова: блок детектирования, γ -излучение, энергетическое распределение импульсов, функция отклика, спектрометрический и радиометрический метод.

Введение

Данная статья является продолжением работы [1] и излагает основы математического аппарата, реализованного в прикладном программном обеспечении спектрометра излучения человека СКГ-АТ1316А (далее спектрометр).

При решении задач радиационной защиты большую роль в определении контролируемых радиационных параметров объекта измерения играет выбор не только оптимального аппаратурного обеспечения (типа детектора, геометрии измерения и т.д.), но и математических методов обработки данных.

В общем случае функция отклика детектора на γ -излучение от объекта измерения, представленная в виде энергетического и амплитудного распределения импульсов (аппаратурного спектра), определяется характером источника излучения и процессами взаимодействия γ -квантов с материалом детектора.

При определении радиационных характеристик объекта методом гамма-спектрометрии задача сводится к анализу спектрометрической информации, поиску и идентификации информативных участков аппаратурного спектра и описанию их функциональными зависимостями. При этом быстрота и точность анализа аппаратурного спектра, а соответственно, и точность определения радиационных характеристик объекта измерения существенным образом зависят от выбранных алгоритмов и методов обработки данных.

Материалы и методы

В качестве устройства детектирования спектрометра используется скинтилляционный блок детектирования БДКГ-10 (рисунок 1) на основе неорганического скинтилляционного кристалла NaI(Tl) размером $\varnothing 150 \times 100$ мм.

Результатом работы БДКГ-10 является энергетическое распределение импульсов, характери-

зующее измеряемый объект относительно его радиационных параметров.

Для обеспечения высокой стабильности измерений блок детектирования БДКГ-10 оснащен непрерывной светодиодной стабилизацией энергетической шкалы и цифровой термокомпенсацией измерительного тракта. Данные преимущества упрощают требования к математическому аппарату и существенно повышают точность измерений.

Методы обработки энергетического распределения импульсов

Для решения функциональных задач с использованием спектрометра, связанных с контролем содержания в легких взрослого человека основных дозообразующих радионуклидов ^{51}Cr ,

^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{124}Sb , ^{141}Ce и ^{144}Ce ; нами разработано и предложено математическое обеспечение на основе спектрометрического и радиометрического методов обработки спектров [1, 2]. В радиометрическом методе энергетический диапазон спектрометра разбивается на интервалы исходя из состава контролируемых радионуклидов и с использованием коэффициентов чувствительности и перекрестных вкладов других радионуклидов, присутствующих в объекте контроля, определяется активность контролируемого радионуклида. При спектрометрическом методе обработки аппаратных спектров идентифицируется депонированный в легких человека радионуклид и определяется его активность с использованием зависимости эффективности регистрации от энергии γ -излучения [3].

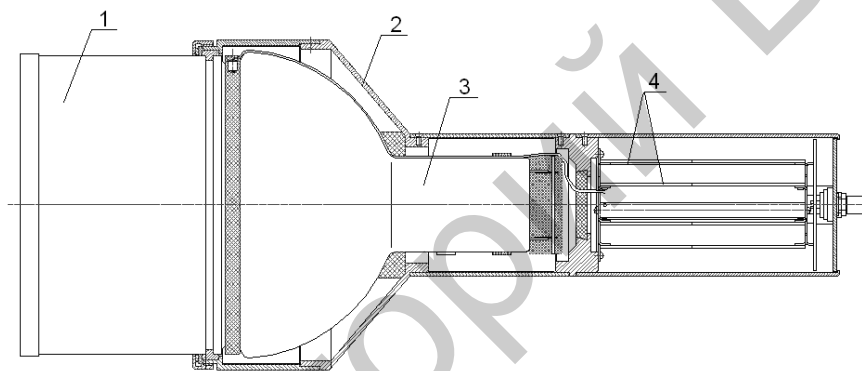


Рисунок 1 – Блок детектирования γ -излучения БДКГ-10: 1 – детектор NaI(Tl); 2 – корпус БДКГ-10; 3 – ФЭУ, 4 – электронные узлы, делитель напряжения, устройства обработки и усилителя

Радиометрический метод. Для обработки спектров выделенной энергии, обусловленных γ -излучением исследуемого объекта, энергетический диапазон спектрометра разбивается на три интервала ($i = 1-3$). Индекс $i = 1$ соответствует энергетическому интервалу 50–1090 кэВ, индекс $i = 2$ – энергетическому интервалу 1090–1400 кэВ, индекс $i = 3$ – энергетическому интервалу 1400–1700 кэВ.

Скорости счета импульсов N_i (имп/с) в энергетических интервалах i для радионуклидов j могут быть представлены в виде выражения:

$$N_i = \sum_{j=1}^n (K_{ij} \cdot A_j),$$

где K_{ij} – коэффициент чувствительности спектрометра в i -м энергетическом интервале к j -му радионуклиду, имп/(с·Бк); A_j – активность j -го радионуклида, Бк.

Энергетический интервал $i = 1$ используется в спектрометре СКГ-АТ1316А для контроля порогового значения суммарной активности указанных выше радионуклидов.

Активность радионуклида ^{60}Co вычисляется путем решения системы линейных уравнений [4].

Оценка суммарной активности контролируемых радионуклидов осуществляется с использованием коэффициентов чувствительности спектрометра к заданным радионуклидам. Коэффициенты чувствительности определены с использованием функций отклика в виде аппаратных спектров, рассчитанных путем моделирования методом Монте-Карло процесса переноса γ -излучения в геометрии измерения [1]. В случае присутствия любого одного, нескольких или всех перечисленных радионуклидов оценка их суммарной активности может быть получена с использованием выражения:

$$A_s \leq A_1 + \Delta_1,$$

где A_1 – максимально возможное значение суммарной активности перечисленных выше радионуклидов (Бк), определяемое из выражения:

$$A_1 = N_{01} \cdot K_{11},$$

где N_{01} – скорость счета в первом энергетическом интервале за вычетом фоновой компоненты и вклада, обусловленного присутствием в объекте измерения радионуклида ^{60}Co , имп/с; K_{11} – коэффициент чувствительности спектрометра к радионуклиду ^{144}Ce , имп/(с·Бк); Δ_1 – основная абсолютная погрешность измерения активности (Бк), вычисляемая в соответствии с требованиями МИ 1552-86.

Выбор коэффициента чувствительности спектрометра к радионуклиду ^{144}Ce при оценке максимально возможного значения суммарной активности контролируемых радионуклидов обусловлен тем фактом, что спектрометр обладает минимальной чувствительностью к данному радионуклиду в заданной геометрии измерения.

Значение активности радионуклидов в легких человека зависит, в частности, от времени, прошедшего с момента поступления данных радионуклидов в легкие, скорости перехода каждого радионуклида из легких в кровь, периода биологического полувыведения и времени проведения обследования человека [2, 5].

Спектрометрический метод. Преимущество оценки активности радионуклидов в легких с использованием спектрометрического метода заключается в возможности идентификации инкорпорированных радионуклидов в легких человека. При спектрометрическом методе обработки анализ измеренного аппаратурного спектра γ -излучения заключается в решении следующих задач [3, 6]:

- поиск пиков полного поглощения (ППП);
- определение параметров ППП (положение центроиды пика, полная ширина пика на полувысоте, площадь пика за вычетом фонового пьедестала) и их погрешностей;
- идентификация радионуклидов по найденным ППП;
- расчет активности и погрешности результата измерения.

На этапе поиска ППП с целью уменьшения статистических выбросов аппаратурный спектр подвергается преобразованию (сглаживанию).

Процедура преобразования заключается в замене количества импульсов в канале x_i значением, рассчитанным по формуле:

$$s(x_i) = \frac{\sum_{j=x_i-b}^{x_i+b} \left(\exp\left(-\frac{(x_i-j)^2}{0,5 \cdot b^2}\right) \cdot y_j \right)}{\sum_{j=x_i-b}^{x_i+b} \exp\left(-\frac{(x_i-j)^2}{0,5 \cdot b^2}\right)}, \quad (1)$$

$$x_i \in [0 \dots x_{\max}]$$

где $s(x_i)$ – количество импульсов преобразованного энергетического распределения в канале x_i ; y_j – количество импульсов аппаратурного спектра в канале x_i ; b – интервал, равный половине диапазона, в котором значения количества импульсов используются в процессе преобразования y_j в канале x_i .

Использование функции (1) позволяет уменьшить статистическую флуктуацию спектра, что в свою очередь приводит к упрощению дальнейшей процедуры обработки спектра, а также к сокращению времени обследования объекта измерения.

Интервал b определяется автоматически в зависимости от интегральной скорости счета аппаратурного спектра во всем энергетическом диапазоне спектрометра. На основе экспериментальных данных, установлена следующая зависимость:

$$b(N) = k(N) \cdot (N \cdot t)^{-0,315}, \quad (2)$$

где $b(N)$ – половина интервала на момент обработки аппаратурного спектра; $k(N)$ – значение интерполяционной функции в виде сплайна третьей степени в зависимости от интегральной скорости счета аппаратурного спектра в энергетическом диапазоне 50–2000 кэВ, имп/с [7]; N – интегральная скорость счета аппаратурного спектра в энергетическом диапазоне 50–2000 кэВ; t – время измерения аппаратурного спектра, с.

Дополнительно значение интервала b корректируется для учета зависимости эффективности регистрации от энергии.

Зависимость (2) позволяет автоматически определить диапазон значений количества импульсов аппаратурного спектра, используемых для выражения (1) в зависимости от интегральной скорости счета аппаратурного спектра в энергетическом диапазоне 50–2000 кэВ.

Поиск максимумов ППП осуществляется в положительных областях энергетического распределения импульсов, модифицированного с использованием выражения:

$$c(x_i) = -\frac{s''(x_i) \cdot s(x_i)}{l}, \quad (3)$$

где $c(x_i)$ – значение количества импульсов модифицированного энергетического распределения в канале x_i ; $s''(x_i)$ – значение второй производной в канале x_i энергетического распределения импульсов, преобразованного с использованием выражения (1); l – уровень детектирования, изменяется в диапазоне от 1 до 10. При уменьшении значения уровня детектирования l вероятность обнаружения слабоинтенсивных ППП возрастает.

ППП считается обнаруженным при выполнении условия:

$$c(x_i) > s(x_i).$$

На рисунке 2 графически представлены участки аппаратных спектров γ -излучения ^{60}Co в энергетическом диапазоне 1000–1600 кэВ (а) и 350–1600 кэВ (б) и энергетические распределения импульсов после математического преобразования с использованием выражений (1)–(3).

Идентификация радионуклидов осуществляется с учетом всех найденных пиков.

Следующим важным этапом в процессе определения активности инкорпорированных радионуклидов является выбор функциональной зависимости для найденных пиков полного поглощения из условия описания аппаратного спектра с минимальным отклонением или необходимой заданной точностью [6, 8].

Для нахождения площади ППП нами предложено использование следующей функции:

$$G(x_i) = \begin{cases} \frac{2 \cdot h}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot (\sigma_1 + \Delta_1 + \sigma_2 + \Delta_2)}} \times \\ \times \exp\left(-\frac{(x_i - x_0)^2}{2 \cdot (\sigma_1 + \Delta_1)}\right), x_i < x_0 \\ \frac{2 \cdot h}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot (\sigma_1 + \Delta_1 + \sigma_2 + \Delta_2)}} \times \\ \times \exp\left(-\frac{(x_i - x_0)^2}{2 \cdot (\sigma_2 + \Delta_2)}\right), x_i \geq x_0, \end{cases} \quad (4)$$

где $G(x_i)$ – значение функции Гаусса, аппроксимирующей участок аппаратного спектра в виде ППП, в канале x_i ; x_0 – номер канала в положении максимума ППП; σ_1 и σ_2 – значения ширин спектральных линий детектора в левой и правой границах ППП из градуировочной за-

висимости по энергетическому разрешению; x_i – номер канала; Δ_1 и Δ_2 – значения корректирующих поправок для σ_1 и σ_2 , определяются в процессе аппроксимации и могут иметь как положительные, так и отрицательные значения; h – количество импульсов в положении максимума ППП за вычетом фоновых импульсов.

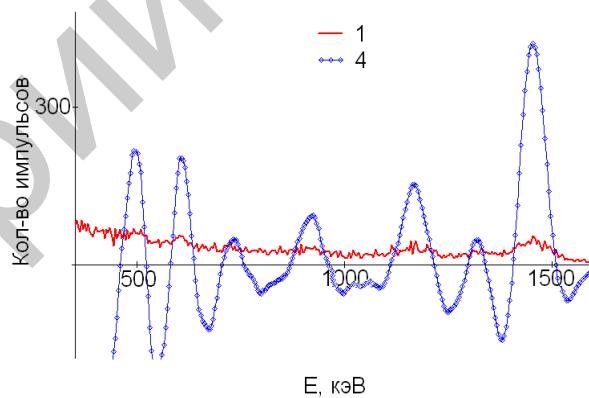
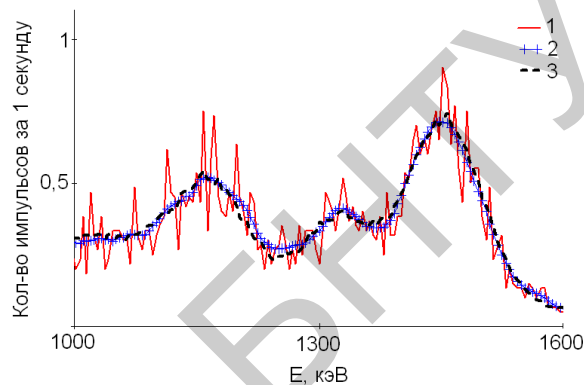


Рисунок 2 – Участки аппаратных спектров γ -излучения радионуклида ^{60}Co с результатами математического преобразования: а – в энергетическом диапазоне 1000–1600 кэВ; б – в энергетическом диапазоне 350–1600 кэВ; 1 – аппаратный спектр γ -излучения радионуклида ^{60}Co , измеренный за время измерения 60 с; 2 – энергетическое распределение импульсов γ -излучения радионуклида ^{60}Co , преобразованное с использованием выражения (1); 3 – аппаратный спектр γ -излучения радионуклида ^{60}Co , измеренный за 3600 с; 4 – результат математического преобразования аппаратного спектра 1 с использованием выражений (1)–(3)

В процессе автоматической аппроксимации функцией (4) к значениям энергетического распределения импульсов, полученным с использованием выражения (1), определяются корректирующие поправки Δ_1 и Δ_2 исходя из условия:

$$\chi_1^2 = \sum_{i=x_{\min l}}^{x_{\min r}} \frac{(s(x_i) - G(x_i) - y_f(x_i))^2}{s(x_i)} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где χ_1^2 – мера отклонения аппроксимирующей функции от имеющихся данных в виде «сглаженного» спектра [9]; $x_{\min l}$ и $x_{\min r}$ – номера каналов левой и правой границы ППП; $y_f(x_i)$ – количество фоновых импульсов в канале x_i .

В качестве меры отклонения аппроксимирующей функции от исходного аппаратурного спектра также используется критерий χ^2 . Оптимальные параметры функции (4) определяются из условия минимума:

$$\chi_2^2 = \sum_{i=x_{\min l}}^{x_{\min r}} \frac{(y(x_i) - G(x_i) - y_f(x_i))^2}{y(x_i)} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где χ_2^2 – мера отклонения аппроксимирующей функции от имеющихся данных в виде исходного аппаратурного спектра; $y(x_i)$ – количество импульсов аппаратурного спектра в канале x_i .

Основным параметром, характеризующим ППП, для спектрометра является полная ширина на полувысоте (ΔE). В соответствии с выражениями (4)–(6) для определения полной ширины на полувысоте нами предложено использование следующей формулы:

$$\Delta E = \frac{2,355 \cdot (\sigma_1 + \Delta_1 + \sigma_2 + \Delta_2)}{2}. \quad (7)$$

Данный параметр зависит от типа кристалла детектора, его размера, геометрии измерения и т.д. и имеет определяющее значение в процесс идентификации радионуклидов.

При анализе ППП, представляющего мультиплет, основная задача сводится к определению высот каждого пика и определению их вкладов друг в друга. Высоты ППП h определяются из выражения:

$$h = a^{-1} \cdot H, \quad (7)$$

где h – столбец значений количества импульсов в максимумах ППП, входящих в мультиплет, вычисляется с использованием метода Гаусса, в основе которого лежит алгоритм LU -разложения [4]; a^{-1} – обратная матрица значений коэффициентов вкладов a_{ij} , рассчитывается предварительно с использованием функции Гаусса [4]; H – столбец значений количества импульсов в максимумах ППП, составляющих мультиплет.

Расчет активности идентифицированных радионуклидов и их погрешностей осуществля-

ется с учетом всех найденных и аппроксимированных ППП [3, 8].

Фоновые характеристики

В приведенных выше рассуждениях предполагалось, что фоновая составляющая уже вычтена из сигнала. Известно, что точность определения фоновых характеристик имеет определяющее значение при проведении измерений активности контролируемых радионуклидов. В частности, эта проблема обостряется при измерениях уровня активности радионуклидов на пределе детектирования спектрометра.

В процессе измерения тело человека ослабляет внешнее γ -излучение, являясь своеобразной защитой для блока детектирования в геометрии измерения СКГ-АТ1316. Эффект экранирования зависит от массы и роста обследуемого. Таким образом, фон, который следует вычитать при проведении измерений активности контролируемых радионуклидов, является функцией отклика детектора при наличии в кресле спектрометра чистого фантома, максимально соответствующего антропометрическим данным обследуемого. Для решения данной задачи используется унифицированный фантом всего тела человека УФ-02Т, который воспроизводит антропометрические характеристики тела человека с требуемой точностью. Данный фантом является дорогостоящим средством измерений, имеет большую массу и объем, что вносит соответствующие трудности при его периодической доставке на место установки и использования спектрометра. С целью возможности оперативного определения фоновых характеристик в спектрометре реализованы функции генерирования и интерполирования фоновых характеристик.

Функция генерирования фоновых характеристик используется для адаптации спектрометра к внешнему радиационному фону в месте его установки и использования. В лабораторных условиях на этапе градуировки спектрометра осуществляется измерение фонового спектра без фантома и трех спектров с использованием фантомов УФ-02Т, имитирующих тело взрослого человека различной массы. Для трех фантомных спектров определяются отношения к фоновому спектру без фантома во всем энергетическом диапазоне спектрометра.

Используя данную связь, после установки спектрометра на месте эксплуатации осуществляется периодическое измерение фонового спектра

без фантома с последующим генерированием фантомных спектров по указанному алгоритму.

Для учета разнообразия массы и роста пациентов при вычислении фонового спектра для конкретного человека используется интерполяция и экстраполяция фантомных спектров. Фоновые характеристики конкретного пациента вычисляются с использованием линейно-кусочной интерполяции и, если нужно, экстраполяции, где переменной является квадратный корень величины, рассчитанной из соотношения массы и роста обследуемого.

Программное обеспечение

Разработанные методы обработки спектрометрической информации реализованы в программном обеспечении «SICH1316A», предназначенном для обеспечения спектрометрических и радиометрических измерений содержания инкорпорированных γ -излучающих нуклидов с помощью спектрометра излучения человека СКГ-АТ1316А.

Программное обеспечение позволяет проводить автоматическую подготовку спектрометра к

работе, осуществлять оперативный контроль внешних фоновых характеристик, управлять набором спектра, определять активность инкорпорированного радионуклида ^{60}Co в легких человека, контролировать суммарную активность перечисленных выше радионуклидов в отсутствии или в присутствии ^{60}Co путем обработки спектров радиометрическим методом, проводить поиск пиков полного поглощения с определением их параметров, идентифицировать радионуклиды в соответствии с рабочей библиотекой (рисунок 3), определять активности обнаруженных радионуклидов с использованием зависимости эффективности регистрации от энергии γ -излучения, формировать базу данных результатов обследования, а также интерполировать и экстраполировать фоновые спектры в зависимости от массового показателя пациента.

При окончательной оценке содержания радионуклидов в легких и оценке ожидаемой годовой эффективной дозы внутреннего облучения для конкретного пациента учитываются его антропометрические характеристики (вес, рост, возраст, пол).

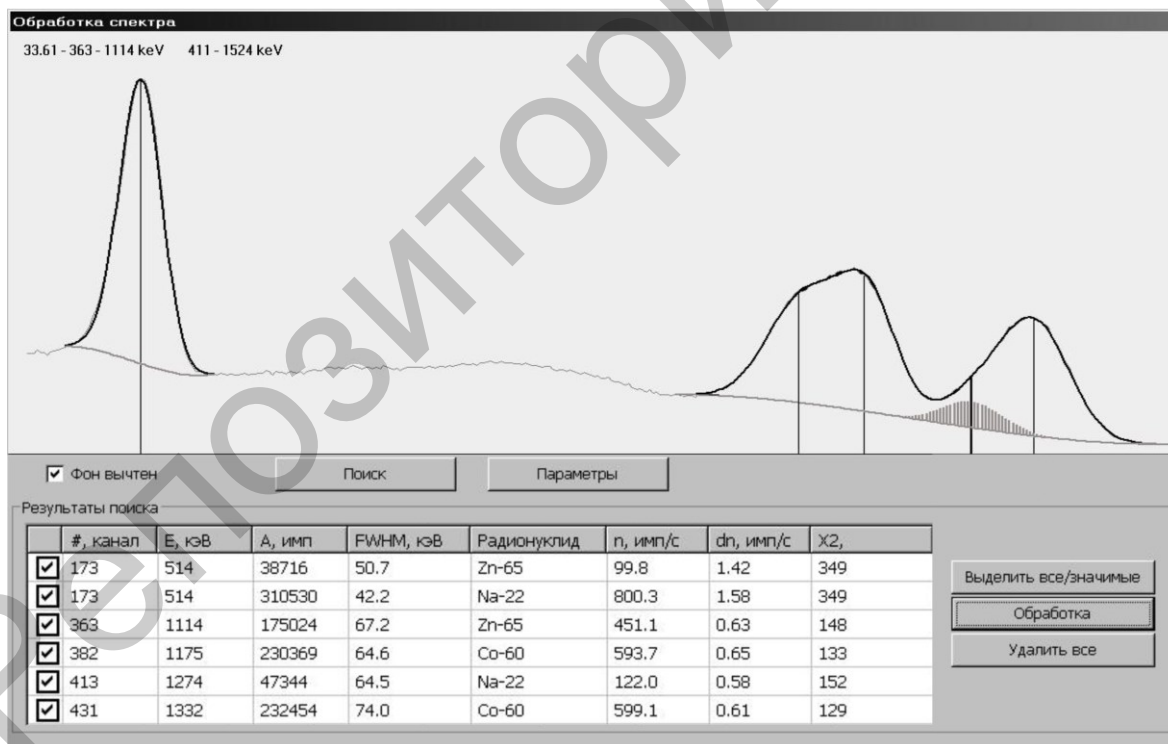


Рисунок 3 – Результат спектрометрической обработки участка аппаратного спектра

Заключение

Совокупность радиометрического и спектрометрического методов обработки спектров

позволяет расширить функциональные возможности спектрометра излучения человека СКГ-АТ1316А, а также повысить точность измерений. Важной особенностью обработки спектра с ис-

пользованием радиометрического метода является возможность контролировать присутствие в легких человека других, помимо ^{60}Co , γ -излучающих радионуклидов и определять максимально возможный уровень их суммарной активности. Преимущества обработки аппаратурного спектра спектрометрическим методом заключаются в возможности идентификации и определения активности инкорпорированных в легкие человека неизвестных радионуклидов. Использование представленных функциональных зависимостей позволяет уменьшить статистические флуктуации аппаратурного спектра, существенно повысить чувствительность спектрометрического метода и определить основные параметры ППП с высокой точностью, что в свою очередь приводит к уменьшению полной погрешности результата измерения, а также уменьшению времени обследования пациента. Предложенные в данной работе решения для определения основных параметров ППП, составляющих мультиплеты, позволяют расширить возможности спектрометра в части разделения ППП, идентификации радионуклидов и определении их активности при использовании спектрометрического метода обработки аппаратурных спектров.

К существенным достоинствам спектрометрического комплекса также можно отнести и возможность генерирования фоновых фантомных спектров с учетом особенностей места эксплуатации спектрометра. При наличии изменений внешнего радиационного фона существует возможность оперативно адаптировать спектрометр к новым условиям без использования фантома.

Полученные решения поставленных задач, изложенные в данной публикации, а также в ра-

боте [1], позволили сформировать функционально завершенное средство измерений для целей инструментального скрининг-мониторинга внутреннего облучения.

Список использованных источников

1. Жуковский, А.И. Спектрометр для измерения активности гамма-излучающих радионуклидов в легких взрослого человека. Часть I. Результаты экспериментальных и теоретических исследований / А.И. Жуковский [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 1 (6). – С. 29–35.
2. IAEA Safety Reports Series # 37: Methods for Assessment Occupational Radiation Doses Due to Intakes of Radionuclides, Vienna, 2004.
3. Райлли, Д. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов / Д. Райлли, Н. Энслин, С. Хэйстингс мл. – М.: БИНОМ, 2000. – 720 с.
4. Дураков, Б.К. Краткий курс высшей алгебры / Б.К. Дураков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 232 с.
5. Голутвина, М.М. Контроль за поступлением и содержанием радиоактивных веществ в организм человека / М.М. Голутвина, Ю.В. Абрамов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 168 с.
6. Knoll, G.F. Radiation detection and measurement. Third Edition / G.F. Knoll. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. – 802 pp.
7. Волков, Е.А. Численные методы: учебное пособие / Е.А. Волков. – 2-е изд. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
8. Волков, Н.Г. Методы ядерной спектрометрии / Н.Г. Волков, В.А. Христофоров, Н.П. Ушакова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
9. Худсон, Д. Статистика для физиков. Лекции по теории вероятности и элементарной статистике / Д. Худсон. – М.: Мир, 1970. – 296 с.

Zhukouski A., Tolkachev A., Konovalov E., Guzov V., Khrutchinsky A., Kutsen S., Chudakov V.

Spectrometer for measurement gamma-emitting nuclides in the human lungs. Part 2. Mathematical support of AT1316A

In this article is presented the description of the detection unit of the whole body counter AT1316A. Is shown brief description of the mathematical processing methods. Is presented the main advantages of the offered functions. (E-mail: alexzhukovski@gmail.com)

Key words: detection unit, γ -radiation, energy distribution of γ -radiation, response function, spectrometric and radiometric processing methods.

Поступила в редакцию 10.06.2013.