



UA0300399

БЕТА-СПЕКТРОМЕТРИЯ ПРОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В.В. Бабенко, А.С. Казимиров, А.Ф. Рудык
НПП «АтомКомплекcПрилад», Украина

Беспрецедентная по своим масштабам авария на ЧАЭС, в результате которой были загрязнены большие участки территорий Украины, Белоруссии и России, потребовала разработки экспрессных методов контроля содержания радионуклидов в объектах внешней среды. В связи с этой потребностью последнее десятилетие в прикладной ядерной спектрометрии отличалось бурным развитием гамма-, относительно небольшими успехами альфа- и довольно скромными достижениями бета-спектрометрии. Такое состояние обусловлено в основном сложностью обработки непрерывных бета-спектров и трудностями, связанными с учетом деформации спектров в пробах с различными физико-химическими параметрами (плотностью, дисперсностью, химическим составом и др.).

Возникшую после Чернобыльской катастрофы проблему инструментального определения ^{90}Sr из-за указанных выше трудностей классическая бета-спектрометрия не смогла решить, и пришлось прибегнуть к её нестандартному варианту. Определение активности с помощью сцинтилляционных бета-спектрометров типа СЕБ-01.ХХ производства фирмы «АтомКомплекcПрилад» (Украина) и их аналогов основано на синтезе принципов радиометрии, спектрометрии и математического моделирования.

1. Метод определения активности

В основу метода положена регистрация с помощью сцинтилляционного детектора непрерывных бета-спектров, отличающихся друг от друга формой и положением на энергетической шкале. Типичные бета-спектры цезия, калия и стронция приведены на рис. 1–6. Для их обработки с целью определения активности отдельных нуклидов используется метод энергетических интервалов (ЭИ) или окон. Измеряемые в ЭИ значения скорости счета исследуемой пробы с учетом фона представляются в виде суперпозиций скоростей счета исследуемых радионуклидов. Спектр пробы, содержащей смесь ожидаемых нуклидов, раскладывается по спектрам эталонных моно-источников, аттестованных по активности и измеренных в условиях, максимально приближенных к условиям измерения исследуемой пробы. Математически это аппроксими-

руется линейной комбинацией n заданных базисных числовых функций и представляет систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11}X_1 + \dots + \varepsilon_{1j}X_j + \dots + \varepsilon_{1n}X_n &= b_1 - b_1^\phi \\ \varepsilon_{21}X_1 + \dots + \varepsilon_{2j}X_j + \dots + \varepsilon_{2n}X_n &= b_2 - b_2^\phi \\ \dots &\dots \\ \varepsilon_{m1}X_1 + \dots + \varepsilon_{mj}X_j + \dots + \varepsilon_{mn}X_n &= b_m - b_m^\phi \end{aligned}$$

или в матричной форме

$$AX = b^0,$$

где

b_i, b_i^ϕ – скорости счета в i -м ЭИ при измерении, соответственно, пробы и фона установки;

$b_{i0} = b_i - b_i^\phi$ – скорость счета полезного сигнала;

X_j – активность j -го нуклида (компоненты вектора X);

ε_{ij} – чувствительность (эффективность) бета-спектрометра к излучению j -го нуклида в i -м ЭИ;

A – матрица плана СЛАУ (матрица чувствительности).

Определяемые при градуировке значения ε_{ij} (элементы матрицы плана) являются численными базисными функциями математической модели.

Количество ЭИ, их положение и ширина выбираются с учетом специфики спектров радионуклидов при решении конкретной задачи и оптимизируются с учетом устойчивости решения СЛАУ. Правая часть системы является набором обычно некоррелированных между собой результатов измерения, подчиняющихся распределению Пуассона и содержащих статистические погрешности с нормальным распределением:

$$b_i^0 = (b_i - b_i^\phi) \pm \sigma_i, \quad \sigma_i = \sqrt{\frac{b_i}{t} + \frac{b_i^\phi}{t_\phi}},$$

где

t, t_ϕ – время измерения пробы и фона соответственно.

Значения активности нуклидов находятся путем решения обычно переопределенной системы уравнений, количество которых m определяется числом ЭИ.

Это так называемая обратная, некорректно поставленная математическая задача наименьших квадратов (НК), имеющая, как правило, неустойчивое решение по отношению к неточностям используемых экспериментальных

данных. Общеизвестна высокая чувствительность метода наименьших квадратов (МНК) к неоднородности статистики исходных данных. Существуют фундаментальные доводы против использования нормальных уравнений при решении задачи НК: матрица нормальных уравнений имеет очень большое число обусловленности, поэтому независимо от метода их решения ошибки входной информации и округления чрезмерно преумножаются в вычисленном решении. В работах А.Н. Тихонова и др. авторов [4] разработаны различные варианты регуляризованного метода наименьших квадратов, позволяющие повышать устойчивость решения.

Мы отказались от традиционных путей решения переопределенных СЛАУ и предложили использовать наиболее надежный с точки зрения учета и переноса погрешностей заданной информации, ошибок округления и линейной зависимости базисных функций, метод SVD (сингулярное разложение матриц) [5, 6]. Он лишен недостатков, возникающих при использовании нормальных уравнений, и лучше других удовлетворяет необходимым физическим и метрологическим условиям решаемой задачи [16, 17, 18].

Сингулярное разложение $m \times n$ – матрицы плана

$$A = U \Sigma V^T, \quad U^T A V = \Sigma$$

позволяет получить вектор решения X задачи наименьших квадратов (ЗНК) из вектора данных правой части b_0 с помощью двух ортогональных преобразований и одного преобразования с диагональной матрицей:

$$q = U^T b^0, \quad p = \Sigma^{-1} q, \quad X = V p,$$

где

U – ортогональная $m \times m$ – матрица;

Σ – диагональная $m \times n$ – матрица;

V – ортогональная $n \times n$ – матрица;

q, p – сингулярные вектора.

T – символ транспонирования матриц.

Таким образом, задача $A X \cong b_0$ сведена к эквивалентной ЗНК с диагональной матрицей и нет необходимости перехода к системе нормальных уравнений. Отметим целесообразность применения взвешенного метода наименьших квадратов и его преимущества. Использование матрицы весовых коэффициентов для масштабирования строк в виде

$$W = \begin{pmatrix} 1/\sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & 1/\sigma_i & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1/\sigma_m \end{pmatrix}$$

делает матрицу дисперсий экспериментальных данных единичной, что существенно упрощает ответственную и громоздкую процедуру переноса погрешностей. Элементы ковариационной матрицы погрешностей решения превращаются в простые выражения, а это значительно сокращает объем вычислений и повышает точность решения.

2. Погрешности результатов анализа

Точность результатов анализа определяется погрешностью входных данных матрицы плана, погрешностью метода решения, ошибками округления и статистическими погрешностями правой части системы.

В случае однократных измерений суммарная относительная погрешность определения j -й компоненты вектора решения X (активности j -го радионуклида) рассчитывается согласно методических указаний МИ 1552-86 по формуле (для $P = 0,95$):

$$\delta X = 0,95 K [\delta_c X + \delta_\theta X]$$

где

$\delta_c X = 2S_x$ – граница относительной статистической погрешности результата однократного измерения, отвечающая доверительной вероятности $P = 0,95$;

S_x – относительное среднеквадратическое отклонение результата однократного измерения;

$\delta_\theta X = 1,1 \sqrt{\sum_k \delta_k^2 X}$ – граница не исключенной систематической относительной погрешности результата анализа, отвечающая доверительной вероятности $P=0,95$;

$\delta_k X$ – не исключенные систематические относительные погрешности метода и средств измерений (погрешность градуировки по чувствительности, погрешность, обусловленная различием в объемах градуировочного источника и измеряемой пробы и т.п.)

$0,95K$ – коэффициент, значения которого берутся из приведенной в МИ 1552-86 таблицы.

$\delta\theta X/S_x$	0,8	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
$0,95K$	0,76	0,74	0,71	0,73	0,76	0,78	0,79	0,8	0,81

В качестве S_x используется большее из выражений:

$$S_b = \frac{\sqrt{\sigma^2 X}}{X} \quad S_p = S_b \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m W_{ii}^2 R_i^2}{m-n}} = K_p S_b$$

где

S_b – относительная среднеквадратическая взвешенная погрешность j -й компоненты вектора решения;

$\sigma^2 X$ – j -й диагональный элемент ковариационной матрицы погрешностей решения (дисперсия j -й компоненты вектора решения);

S_p – погрешность разброса;

W_{ii} – весовые коэффициенты;

m, n – соответственно количество уравнений системы и неизвестных ($m > n$);

R_i – невязка при решении СЛАУ;

K_p – квадратный корень из остаточной суммы квадратов, нормированной на $(m - n)$, т.е. нормированная невязка.

Величина S_p может быть очень малой, даже равной нулю. Значение S_b никогда нулю не равно и уменьшается по мере добавления экспериментальной информации.

Суммарная относительная погрешность определения j -й компоненты вектора решения (активности j -го радионуклида) в случае многократных измерений (наблюдений) рассчитывается согласно ГОСТ 8.207-76, и для доверительной вероятности $P = 0,95$ имеет вид:

$$\delta X = \frac{\delta_c X + 1,1 \sqrt{\frac{\sum \delta_k^2 X}{k}} \sqrt{\frac{\sum \delta_k^2 X}{k} + S_x^2}}{S_x + \sqrt{\frac{\sum \delta_k^2 X}{k}}}$$

где

$\delta_c X$ – доверительные границы случайной погрешности результата измерений;

S_x – оценка среднего квадратического отклонения результата измерений;

$\delta_k X$ – не исключенные систематические относительные погрешности метода и средств измерений.

Для многократных измерений

$$\delta_c X = t_p(l) S_x; \quad S_x = \frac{1}{X} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (X_i - \bar{X})^2}{l(l-1)}}$$

где

$tp(l)$ – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности $P = 0,95$ при l измерениях;

$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^l X_i}{l}$ – результат измерения (среднее арифметическое результатов отдельных измерений).

Существенно следующее предостережение. Основываясь на современных достижениях электроники и вычислительной математики, указанные выше бета-спектрометры, являясь приборами нового поколения, прекрасно решают задачи определения активности бета-излучающих радионуклидов в различных пробах, но только при априорно известном нуклидном составе и соответствующей ему градуировке. Задачу идентификации и определения активности неизвестных радионуклидов они не решают (в отличие от классических альфа- или гамма-спектрометров).

3. О проблемах метрологии в нетрадиционной бета-спектрометрии

При количественной интерпретации результатов, полученных в условиях дефицита чувствительности (малые активности), определяющими параметрами измерительной установки и метода являются пределы обнаружения и измерения. Для их установления и трактовки пользуются одним из традиционных подходов: детерминистским или статистическим. Допустимость того или иного подхода зависит от особенностей конкретной задачи.

Минимальной измеряемой активностью МИА (предел измерения) называют такое минимальное ее количество, которое на данной установке с помощью определенного метода можно измерить за установленное время так, чтобы доверительная погрешность измерения скорости счета полезного сигнала не превышала заданного значения.

Следует особо подчеркнуть существенное различие идеализированного варианта МИА для одного нуклида и действительных МИА в реальных пробах, содержащих смесь нуклидов в различных соотношениях. МИА для одного нуклида служит в основном определенной статической характеристикой и представляет как бы потенциальные возможности установки и метода измерения. Действительные МИА в реальных пробах, полученные экспериментально или рассчитанные согласно определённых методов измерения и обработки их результатов, являются методической динамической характеристикой и служат для практических целей при определении активностей исследуемых образцов.

При детерминистском подходе МИА рассчитывается, как правило, из аналитического выражения для доверительной статистической погрешности измерений и представляется в общем виде формулой:

$$A_{МИА} = \frac{p \left[p + \sqrt{p^2 + 4t\delta^2 \langle n_{\phi} + tD(n_{\phi}) \rangle} \right]}{2\delta^2 \epsilon t}$$

где

p – коэффициент, приводящий результат к определенной доверительной вероятности (квант или распределения погрешностей);

t – время измерения пробы и фона ($t = t\phi$);

δ – доверительная относительная статистическая погрешность измерения;

n_{ϕ} – скорость счета фона для данного нуклида (включая вклад «мешающих» радионуклидов) в определенном энергетическом интервале;

ϵ – чувствительность (эффektivность) измерительного прибора в этом же интервале;

$D(n_{\phi})$ – дисперсия скорости счета фона.

Для доверительной вероятности $P = 0,95$ и при отсутствии «мешающих» радионуклидов формула имеет вид:

$$A_{МИА} = \frac{2 \left(1 + \sqrt{1 + 2n_{\phi_0} \delta^2 t} \right)}{\epsilon \delta^2 t} \approx \frac{3 \sqrt{\frac{n_{\phi_0}}{t}}}{\epsilon \delta},$$

где

n_{ϕ_0} – скорость счета фона измерительной установки.

Это выражение используется в наших методиках [16, 17, 18] для расчета МИА одного нуклида как для отдельных энергетических интервалов (своего рода «дифференциальные» МИА), так и МИА во всем (представляющем интерес для данного нуклида) энергетическом диапазоне. Процедура значения МИА получается из расчета активности одного нуклида по граничным скоростям счета в заданных ЭИ для фонового спектра установки.

Статистический подход, основанный на методе испытаний статистических гипотез, более реалистичен и строг, особенно в случаях, если на уровне низкого фона измеряется активность, сопоставимая с фоном. Оценка результатов измерения проводится с учетом ошибок первого и второго рода. Введено понятие и предложена процедура установления пределов обнаружения и измерения – статистических критериев при интерпретации результатов анализа. Предел обнаружения, численно равный абсолютной погрешности измерения фона, устанавливает область нечувствительности установки и делит измеренные образцы на две группы: не содержащие активность и содержащие какую-то активность. Об измерении какой-либо активности сам по себе предел обнаружения никакой информации не дает, а лишь указывает наи-

большее (максимальное) значение активности, которую в данных условиях измерения нельзя не только измерить, но и обнаружить. С целью упорядочения терминологии пределу обнаружения можно было бы присвоить известную аббревиатуру МДА (максимальная или минимальная детектируемая активность).

В качестве статистического критерия для оценки предельной чувствительности радиометрических установок (предел измерения) целесообразно использовать пороговое, т.е. наименьшее количество радиоактивности, которое может быть измерено с заданной достоверностью, и именовать его МИА (минимальной измеряемой активностью).

Международной комиссией по радиологическим единицам и измерениям (МКРЕ) рекомендовано понятие и дано определение минимальной обнаружимой активности:

«Минимальная обнаружимая активность определяется как такая активность данного нуклида, которая в течение данного времени счета даст увеличение показания прибора на величину, в 3 раза превосходящую стандартное отклонение фоновых отчетов, произведенных за это же время».

Заметим, что все рассмотренные подходы приемлемы и дают сходящиеся результаты для установок с относительно высоким уровнем фона. Но для анализа малых активностей на низкофоновых приборах предпочтение следует отдавать методам испытания статистических гипотез и на их основе выработать и узаконить МДА и МИА в качестве метрологических параметров.

Метрологическая база классической бета-спектрометрии довольно слабая (по сравнению с гамма- или даже альфа-спектрометрией), к тому же и её возможностями нельзя полноценно воспользоваться для предложенного нами нетрадиционного метода определения активности. Нестандартное решение самой задачи неизбежно влечёт за собой поиск новых (по-видимому, тоже нестандартных) путей её метрологического обеспечения.

Попытка установления МИА или МДА наталкивается на принципиальное противоречие: нельзя получить приемлемые аналитические выражения для погрешностей и одновременно обеспечить устойчивое решение задачи. Компромиссные способы решения давали приемлемые результаты, но только для идеализированных МИА и были они все-таки приближением. Критерием истины при разрешении очевидных трудностей трактовки и получения аналитических выражений для пределов обнаружения и измерения может быть только их проверка на основе экспериментальных результатов. Полноценным параметром могут быть только экспериментально определяемые МИА и МДА, но общеизвестные трудности изготовления эталонных источников малой активности, дороговизна и затраты времени на их измерение делают такое решение задачи практически нереальным.

Дальнейший поиск компромиссов натолкнул нас на разработку оригинального метода экспериментального поиска (определения) реальных МДА и

МИА на основе моделирования спектров смеси нуклидов с заданными соотношениями их активностей.

Моделирование спектров осуществляется методом простых арифметических манипуляций с реальными спектрами излучения эталонных источников и фона измерительной установки.

Активность модельного источника можно рассчитать из выражения:

$$A^{\otimes} = A_э \frac{t_э}{t_э + t_ф},$$

где

$A_э$ – активность эталонного источника;

$t_э, t_ф$ – время измерения эталона и фона соответственно.

Располагая эталонными моноисточниками и манипулируя временами измерения $t_э$ и $t_ф$, можно смоделировать спектры излучения источников практически с любой заданной активностью $A^{\otimes} \leq A_э$, а также спектры наборов радионуклидов с заданными соотношениями их активностей.

Для практического поиска реальных МДА и МИА используется выражение для статистической погрешности одноразовых измерений:

$${}^{0,95}\delta_c X = \frac{2\sqrt{\sigma_x^2}}{x} 100[\%],$$

где

X – рассчитанная активность j -го нуклида (вектор решения СЛАУ);

σ_x^2 – дисперсия величины X (диагональный элемент ковариационной матрицы погрешностей решения).

Величина ${}^{0,95}\delta_c X$ визуализируется при обработке спектров. Появление значений ${}^{0,95}\delta_c X \geq 100\%$ эквивалентно выражению:

$$X \leq 2\sqrt{\sigma_x^2} = 2\sigma_x = A_{МДА},$$

что свидетельствует о наступлении момента, когда полезный сигнал измеряемой пробы ниже предела обнаружения для выбранных условий измерения.

Подбором времени измерения образцовых источников (практически это занимало у нас не более десятков секунд) легко моделируется серия спектров, для которых значения ${}^{0,95}\delta_c X$ будут «осциллировать» вблизи 100% (поиск МДА) или другого заданного значения (например, 50% – поиск МИА).

В пакете АК1 для бета-спектрометрии предусмотрен расчет МДА и МИА для одного нуклида по фоновому спектру, т. е. приводятся значения для идеализированных условий измерения. Проверка результатов этих расчетов с по-

мощью модельных спектров мононуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K дала практически идеальное совпадение, что подтверждает пригодность обоих методов для определения МИА и МДА в идеализированных условиях измерений.

Моделируя спектры наборов нуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K с учетом их нормативных значений (согласно ДР-97), можно составить удобные для практического пользования таблицы реальных МИА на фоне «мешающих» радионуклидов. Такие таблицы помогут потребителям легко ориентироваться при решении конкретных задач.

Пакет программ АК1 позволяет легко и удобно производить арифметические манипуляции со спектрами и обеспечивает моделирование спектров практически в любом диапазоне активностей гипотетических источников.

При моделировании спектров для поиска МИА предпочтение следует отдавать эталонным источникам, используемым для калибровки по эффективности. В этом случае модельные спектры имеют преимущество даже перед реальными, так как лишены систематической погрешности по активности, присущей разным источникам. К тому же эти источники, как правило, обеспечивают высокую интенсивность счета, что экономит время при практической процедуре поиска МИА.

Предлагаемый метод моделирования спектров и основанная на нем методика поиска реальных МДА и МИА позволяют оперативно исследовать возможности спектрометров и методик в интересующем диапазоне значений активности с целью оптимизации процесса измерения и рационального использования измерительных установок. Если закончить в метрологии моделирование спектров, то в перспективе можно будет существенно упростить и удешевить метрологическое обеспечение бета-спектрометрии.

При измерении активности неравновесных радионуклидов (например, ^{90}Sr в свежем молоке) необходима калибровка спектрометра с помощью разделённых нуклидов. Довольно трудную процедуру разделения и метрологического обеспечения величины активности, полученных моноисточников удаётся обойти, если воспользоваться определёнными соотношениями чувствительности (эффективности) – спектральными коэффициентами, суть которых в следующем.

Спектр эмиссии электронов из поверхности образца с фиксированными физико-химическими параметрами (диаметр, масса, атомный номер, дисперсность и др.) постоянен и для эталонных объёмных источников его можно считать дополнительным метрологическим параметром этого образца. При использовании метода энергетических интервалов (ЭИ) для характеристики подобных спектров целесообразно пользоваться отношением количества зарегистрированных электронов в выбранных интервалах к их количеству в диапазоне регистрации за одно и то же время. В практической бета-спектрометрии эти отношения трансформируются в отношения чувствительностей спектрометра. Для характеристики измерительного комплекса (спектрометр вместе с эталонными источниками в конкретных геометриях измере-

ния) предлагается ввести понятия спектральных коэффициентов ζ_{ij} и спектральных долей ψ_{ij} радионуклидов (для конкретного набора энергетических интервалов):

$$\zeta_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_j}; \quad \zeta_{i\Sigma} = \frac{\varepsilon_{i\Sigma}}{\varepsilon_\Sigma}; \quad \psi_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_{i\Sigma}},$$

где

- ε_{ij} – чувствительность спектрометра в i -м ЭИ для j -го радионуклида;
- $\varepsilon_j = \sum_i \varepsilon_{ij}$ – суммарная чувствительность в диапазоне регистрации для j -го нуклида;
- $\varepsilon_{i\Sigma}$ – чувствительность спектрометра в i -м ЭИ для смеси равновесных нуклидов (например, $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$);
- $\varepsilon_\Sigma = \sum_i \varepsilon_{i\Sigma}$ – суммарная чувствительность в диапазоне регистрации для смеси равновесных нуклидов.

Очевидно, что для равновесных источников (например, $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$)

$$\psi_{i\text{Sr}} + \psi_{i\text{Y}} = 1.$$

Полученные на разных спектрометрах одного типа с помощью конкретных эталонных образцов одинаковой толщины (г/см^2) величины ψ_{ij} и ζ_{ij} должны отличаться только в пределах статистических погрешностей. Отклонение может быть обусловлено не идентичностью ЭИ и ликвидируется коррекцией калибровки по энергии.

Наборы спектральных коэффициентов и долей должны быть объектом специального метрологического исследования, проводимого под эгидой органов Держстандарта Украины, с присвоением им статуса опорных. После этого их можно рассматривать как дополнительный метрологический параметр измерительного комплекса и использовать для практических целей.

В частности, спектральные коэффициенты тонких проб можно использовать для характеристики степени идентичности спектрометров данного типа (серии), а на образцовых спектрометрах можно решать и обратную задачу: оценивать степень «тонкости» исследуемых образцов, опираясь на опорные коэффициенты. На основе спектральных коэффициентов и долей нами разработан метод упрощенной калибровки спектрометра по чувствительности для измерения неравновесного ^{90}Sr в свежем молоке. Суть его в следующем.

С помощью эталонного равновесного источника $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, используемого для калибровки по чувствительности, производится тестирование спектрометра: коэффициенты $\zeta_{i\text{Sr}}$ в пределах погрешностей должны совпадать с

опорными, полученными на образцовом спектрометре. Тогда калибровка спектрометра заключается в расчете чувствительностей для ^{90}Sr и ^{90}Y из чувствительности спектрометра для равновесного эталонного источника $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ согласно выражений:

$$\varepsilon_{iy} = \varepsilon_{i\Sigma} \psi_{iy} ; \varepsilon_{iSr} = \varepsilon_{i\Sigma} - \varepsilon_{iy} = \varepsilon_{i\Sigma}(1 - \psi_{iy}) .$$

где

ψ_{iy} – опорные спектральные доли, полученные на образцовом спектрометре с помощью радиохимического разделения нуклидов.

Таким образом, с помощью одного эталонного равновесного источника $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ можно довольно быстро и легко прокалибровать любое количество однотипных спектрометров, не прибегая к громоздкой и дорогостоящей радиохимии.

Заслуживает внимания также расчет чувствительности бета-спектрометра методом Монте-Карло, что могло бы вместе с моделированием спектров существенно упростить процедуру метрологического обслуживания измерений.

В заключение отметим, что бета-спектрометры типа СЕБ-01.ХХ предназначены для определения активности ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K и других β -излучающих радионуклидов в счетных образцах (приготовленных из проб продуктов питания и объектов внешней среды) различной конфигурации: от «тонких» после радиохимии или типа аспирационных фильтров АФА РСП до «толстых» весом 160 грамм на площадь 170 см², включая и точечную геометрию для анализа «горячих» частиц.

Диапазон измерения активности радионуклидов охватывает 0,1–104 Бк и позволяет инструментально контролировать основную часть продуктов питания согласно ДР-97, а при использовании необходимых условий концентрирования также объекты внешней среды (воду, воздух и др.) согласно НРБУ-97, в том числе по содержанию ^{90}Sr и ^{90}Y с нарушением их радиоактивного равновесия.

Спектрометр регистрирует β -излучение в диапазоне энергий 100–3500 кэВ, имеет энергетическое разрешение порядка 10–15% для конверсионных электронов 137 мВа, обладает интегральной нелинейностью не хуже 1% и временной нестабильностью не больше 2%. В качестве детектора используется сцинтилляционная пластмасса толщиной 6–8 мм и диаметром в диапазоне 40–150 мм в зависимости от решаемой задачи. В стадии разработки полупроводниковые детекторы с большой поверхностью.

Стабилизированные блоки питания совместно с программной стабилизацией коэффициента усиления позволяют проводить длительные измерения, обеспечивая их высокое качество, а разработанные под конкретные задачи и

официально утвержденные методики выполнения измерений [16, 17, 18] гарантируют достоверность результатов анализа.

Типичные параметры бета-спектрометров СЕБ-01ХХ для различных геометрий счетных образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные условия измерения и некоторые метрологические параметры бета-спектрометров СЕБ-01ХХ

Параметры спектрометра	Диапазон энергий мэВ	Интенсивность фона имп./сек	Чувствительность (эффективность)			МДА ^{90}Sr [Бк] при $t_{\text{изм}}=5000$ сек	
			$\left[\frac{\text{имп}}{\text{сек} \cdot \text{Бк}} \right]$			Расчетные (идеализированные)	Реальные на фоне 80 Бк/кг ^{40}K и 70 Бк/кг ^{137}Cs
Геометрия счетного образца			$^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$	^{40}K	$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$		
фильтр АФА РСП (диск $60\text{мг}/20\text{см}^2$)	0,1 ÷ 2,28	0,6 ÷ 1,0	0,300		0,79	0,08	
диск $\frac{1100\text{мг}}{20\text{см}^2}$	0,1 ÷ 2,28	0,6 ÷ 1,0	0,140		0,64		
диск $\frac{5000\text{мг}}{30\text{см}^2}$	0,1 ÷ 2,28	0,6 ÷ 1,0	0,085	0,22	0,44	0,13	
диск $\frac{10000\text{мг}}{30\text{см}^2}$	0,1 ÷ 2,28	0,6 ÷ 1,0	0,062	0,13	0,29		
диск $\frac{15000\text{мг}}{30\text{см}^2}$	0,1 ÷ 2,28 0,2 ÷ 2,28 0,1 ÷ 1,3 0,2 ÷ 1,3	0,6 ÷ 1,0 0,5 ÷ 0,8 0,35 ÷ 0,6 0,3 ÷ 0,5	0,049 0,033 0,049 0,033	0,093 0,081 0,093 0,081	0,263 0,236 0,222 0,195	0,25	0,35
диск $\frac{30000\text{мг}}{30\text{см}^2}$	0,1 ÷ 2,28	0,6 ÷ 1,0	0,038	0,049	0,097		
диск $\frac{160\text{г}}{170\text{см}^2}$	0,2 ÷ 2,28	1,6 ÷ 2,0	0,025	0,027	0,068		

Примечание. При расчете чувствительности по $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ учитывалась активность только одного нуклида.

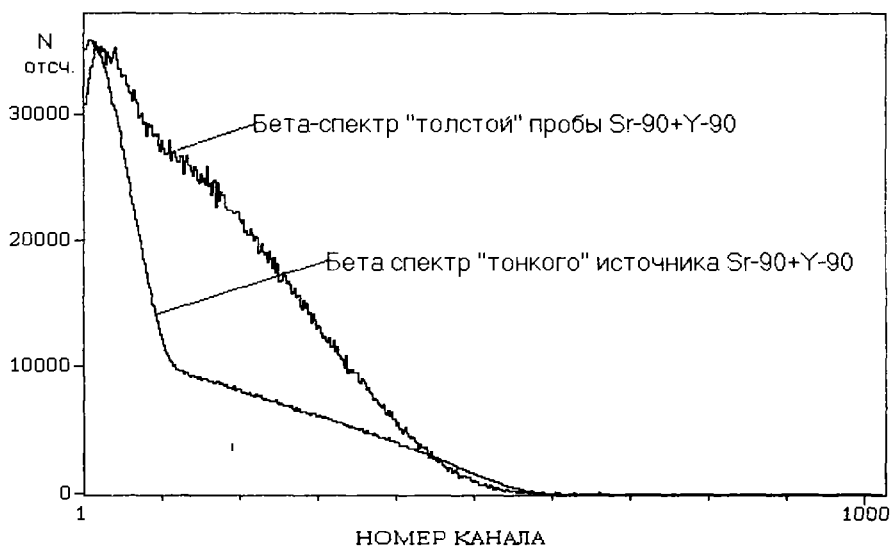


Рис. 1



Рис. 2

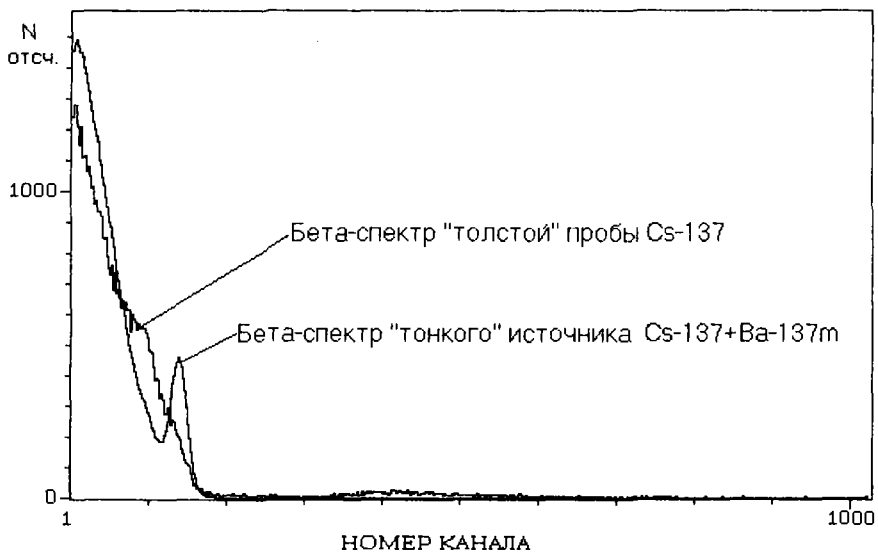


Рис. 3



Рис. 4

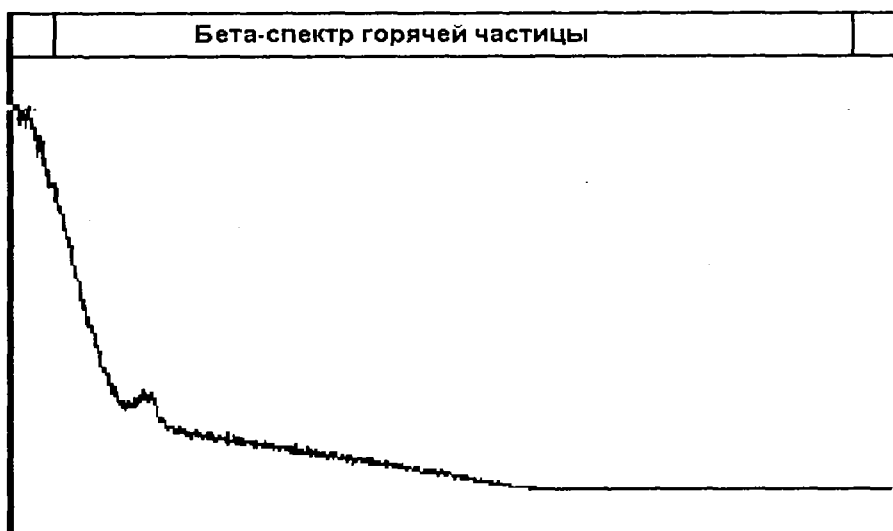


Рис. 5



Рис. 6

Литература

1. Методические рекомендации по оценке радиационной обстановки окружающей среды. – К.: М-во здравоохранения УССР, 1988.
2. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986.
3. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Тихонов А.И. и др. Численные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1990.
5. Соколов А.М. POMNK – Программа приближения экспериментальных данных линейной комбинацией функций // Препринт КИЯИ-85-32. – К.: ИЯИ АН УССР, 1985.
6. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980.
7. НРБУ-97
8. Допустимые уровни содержания радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах питания и питьевой воде (ДР-97).
9. Mc Farren E.E. e.a. *Analyt. Chem.*, 1970. Vol. 42, № 3. – P. 358–365.
10. Худсон Д. Статистика для физиков. – М.: «Мир», 1970.
11. Дмитриенко А.В., Корнеев А.А., Купный В.И., Сухоручкин А.К. Внедрение новых норм РБ Украины (НРБУ-97) на объекте «Укрытие» // Проблемы Чернобиля, – Чернобыль, 1999. – вып. 5.
12. Кузьмина И.Е., Токаревский В.В. Частицы дисперсной фазы аэрозолей объекта «Укрытие» // Проблемы Чернобыльської зони відчуження. – К.: Наук. думка, 1996. – Вип. 4.
13. Лихтарев И.А., Корнеев А.А., Бондаренко О.А., Берковский В.Б., Чумак В.К., Дмитриенко А.В. Пути практической реализации индивидуального дозконтроля внутреннего и внешнего облучения при проведении работ на объекте «Укрытие» // Проблемы Чернобиля. – Чернобыль, 1995. – Вип.5.
14. Емельянов В.В. К оценке чувствительности при определении низких уровней активности в объектах окружающей среды: Радиохимия, 1998. – Т. 40, № 2.
15. Бабенко В.В., Казимиров А.С., Рудык А.Ф. Проблемы определения малых активностей: Препринт АКП-2-98. – К, 1998.
16. Активность бета-излучающих радионуклидов в счётных образцах. Методика выполнения измерений с использованием сцинтилляционных спектрометров и программного обеспечения АК1, 1998 г.
17. МІ 12-08-99 Активність радіонуклідів ^{90}Sr та ^{90}Y в лічильних зразках, одержаних методом селекції нуклідів. Методика виконання вимірювань з використанням сцинтиляційних спектрометрів та програмного забезпечення АК1.
18. Активность радионуклидов бета-излучения в тонких образцах. Методика выполнения измерений с использованием бета-спектрометров и программного обеспечения АК1, 2000.