

ПРОЦЕДУРА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

И. Ф. Лукашин

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
99001 г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Определение энергетической шкалы гамма-спектрометра обычно выполняется с помощью ОСГИ. Эта процедура, кроме того, что требует специального ядернофизического оборудования, исключает возможность работы в режиме реального времени. Предложен способ и описана процедура калибровки по параметрам естественного гамма-поля. Получены оценки минимальной скважности процедуры.

В настоящее время использование спектрометрической техники в натуральных исследованиях полей гамма-излучения природных сред оправдано для осуществления процессов идентификации излучателей и определения их активности. Важным этапом таких измерений является процесс калибровки измерительного тракта прибора – установление энергетической шкалы спектрометра – калибровочной кривой $E_i=f(i)$ (здесь E_i – энергия центра [мэв] i -того канала спектрометра). [1] Ввиду того, что применяемые спектрометры для средних интервалов энергий ~ 0,1 - 3,0 мэв имеют близкий к линейному характер изменения номера канала с энергией, калибровку проводят по двум-трем характерным ППП в спектрах излучения и по предварительным калибровочным данным, полученным с помощью ОСГИ, скорректированных на случай изотропного источника излучения. По результатам калибровки устанавливаются репрезентативные энергетические диапазоны для отдельных излучателей или их групп, в которые попадает излучение именно этих радионуклидов. Набор статистики в них интерпретируется как активность соответствующего компонента с учетом фоновых процессов, а параметры временного ряда адекватно отражают изменение радиоактивности среды или

набора образцов. Отсюда очевидна необходимость тщательного проведения операции калибровки тракта, а в связи с возможной и часто наблюдаемой нестабильностью коэффициента усиления последнего, более или менее частой перекалибровки. Идеально для исследователя было бы иметь в распоряжении калибровочные параметры параллельно и синхронно с процессом измерения гамма-поля природной среды.

Ступенчатая регулировка коэффициента усиления спектрометрических трактов гамма-комплекса, а также разное положение нулевого порога амплитудных анализаторов практически не позволяют добиться стандартной энергетической шкалы для всех спектрометрических каналов. Более того, в процессе измерения возможны малые длиннопериодные флуктуации этих параметров, например, из-за нестабильности температурного режима погружного устройства, которые могут привести к кажущимся временным флуктуациям активности среды. Поэтому необходимо алгоритмическое приведение энергетической шкалы каналов к стандартной и контроль за вариациями калибровочных соотношений во времени.

Существующий способ проведения калибровки состоит в определении положения центров пиков полного поглощения (ППП) образцовых спектрометрических гамма источников (ОСГИ) в их энергетическом спектре гамма-излучения, и по нескольким реперным точкам (число и положение которых определяется составом ОСГИ) построению калибровочной кривой.

Такой способ имеет ряд существенных недостатков, часто ограничивающих возможности метода, а именно:

- необходимо иметь набор ОСГИ, что само по себе достаточно дорого и хлопотно, и включает в себя ряд формальных процедур (регистрация, поверка, комплекс мер радиационной защиты персонала, сохранность, а также процедуры хранения, выдачи, передачи и пр., пр.);

- такой способ для измерений в режиме реального времени (типа измерений in-situ) вообще не позволяет проводить перекалибровку тракта измерения, т.к. детектор находится в активной среде, куда доставка ОСГИ не возможна, не желательна или сопряжена со значительными техни-

ческими трудностями [1], а извлечение прибора существенно прерывает процесс измерения;

- процесс калибровки – перекалибровки измерительного тракта по ОСГИ занимает достаточно длительное время, сравнимое со временем измерения пробы или природы, на это время аппаратура занята, измерение "сигнала" прервано, в эффективном объеме среды детектора оказываются посторонние, относительно исследовательской задачи, источники излучения, что значительно снижает темп, собственно исследований;

- если же ОСГИ имеют более высокие активности, то возможны принципиальные сомнения в адекватности перекалибровки по ОСГИ при исследовании низкоактивных сред, в принципе, т.к. известно, что при измерениях высоких интенсивностей меняются параметры фотосбора в системе кристалл – ФЭУ, что приводит к нестабильностям коэффициента усиления тракта, т.е., вообще говоря, для каждой интенсивности – свои калибровочные параметры;

- кроме того, спектрометрический тракт обладает определённой временной нестабильностью параметров калибровки, необходима непрерывная, в процессе измерения, калибровка – перекалибровка тракта, т.е. калибровка не до- и/или после- а во-время.

Это можно сделать по параметрам измеряемого (исследуемого) излучения среды или пробы. Подробно состав спектров излучения морских сред представлен нами в [1]. Такими ППП могут быть 2.6, 2.2, 1.76, 1.46, 1.15, 0.92, 0.55, 0.35, 0.24 мэв для общего гамма-фона и 2.6, 1.76, 1.15, 0.88, 0.58 мэв для каскадного излучения среды. Все они имеют естественное происхождение; это кванты сопровождающие распад ядер К-40, а также U и Th рядов. То обстоятельство, что соотношение их концентраций в морских средах имеет невеликие вариации, позволяет использовать их для калибровки трактов в процессе измерения даже без предварительной калибровки по ОСГИ.

Квантовый характер поля гамма-излучения накладывает специфические условия на процесс измерения и обработки спектрометрической информации. Дополнительная (ядернофизическая) случайная составляющая поля обеспечивает нормальность статистических процессов при регистрации частиц и определяет методы обработки статистической информации.

Процедура калибровки основана на предположении о том (и это подтверждено экспериментально [1]), что спектр излучения однородной изотропной среды с равномерно распределенными источниками излучения представляет собой суперпозицию ППП названных энергий гауссовской формы и фоновой подложки экспоненциального вида, и состоит из следующих этапов:

- определение параметров кривой натурального спектра;
- выделение ППП излучателей, надежно идентифицируемых над фоновой подложкой спектра;
- получение параметров.

Определение параметров кривой натурального спектра состоит из последовательности процедур вписания методом наименьших квадратов (МНК) в экспериментальные точки кривой описывающей фоновую подложку и, последовательно, значимые ППП по мере их идентификации. В принципе, это задача распознавания образов, состоящая в отнесении объекта на основании сочетания признаков в ту или другую из заранее определенных и охарактеризованных групп совокупности модельных спектров. Однако, любая такая, достаточно сложная процедура, может быть сведена, в конечном итоге, к простым математическим операциям, а именно:

1. Вписание МНК в экспериментальные точки $I^{(0)}$ кривой вида $I^{(1)} = a \exp(-bE)$. Вычитание из экспериментального спектра значений $I^{(1)}$ поканально. Полученный разностный спектр представляет собой набор ППП, отмеченных выше энергий, гауссовского типа с хвостами распределения уходящими под ось абсцисс.

2. Аппроксимация МНК полученных ППП гауссовскими кривыми типа $J^{(1)} = c + d \exp(-(E-e)^2/g)$ и выделение наибольшего из них, идентифицируемого как ППП 1.46 мэв по параметру d с определением его местоположения по параметру $e_{1.46}$.

3. Определение границ положения ППП 1.46 мэв, корректировка параметра c , расчет значений его вклада в экспериментальный спектр, вычитание его из экспериментального спектра и получение спектра $I^{(1.46)}$ - без калиевой компоненты.

4. Повторение операций пп 1 – 3 для выделения следующего наибольшего ППП. Его идентификация осуществляется с учетом значения $e^{(1.46)}$ и предположением о

том, что калибровочная прямая проходит через начало координат.

5. Аналогичным образом осуществляется последовательная идентификация других статистически обеспеченных ППП из обозначенных выше и получение калибровочных параметров $e^{(i)} = f(E)$.

Скважность калибровки (время осреднения экспериментального спектра) для получения статистически обеспеченных параметров калибровочной прямой напрямую не связана со временем экспозиции и определяется следующим образом.

Ошибка определения положения ППП находится зависимостью [2]:

$$S^2(n_0) = \frac{\chi^4 S_0^2}{2k+1} \left\{ 1 + 3 \frac{\{n_3 + k + \frac{1}{2} - n_0\}^2}{k(k+1)} \right\},$$

здесь $1/\chi^2 = 2/\sigma^2 - 1/6\sigma^4$, σ^2 - дисперсия n_1, n_2 - номера граничных каналов, n_0 - положение центра, $n_3 = n_1 + 1$, $2k$ - число каналов, которое занимает ППП, S_0 - экспериментально полученная площадь ППП.

Оценка требуемой величины скважности τ (по порядку величины) калибровки - перекалибровки спектрометрического тракта для обеспечения ее статистической надежности выглядит следующим образом:

- реально требуемая точность определения положения пика ППП составляет 1 канал спектрометра $S(n_0) = 1.0$ канала;

- дисперсия ППП (σ^2) определяется разрешающей способностью прибора и для детекторов NaI(Tl) средних размеров составляет $\approx 10\%$, поэтому в первых 20 - 30 каналах спектрометра ППП малорепрезентативны (они имеют ширину 2 - 3 канала), т.е. задача тривиальна;

- ширина нормального распределения для 5-ти процентного уровня значимости составляет 4σ , откуда полуширина основания ППП $k = 2\sigma$.

- подставляя значения параметров в выражение с фигурными скобками получаем величину $S_0 = \tau I_{\text{ППП}}$. Значение ее для ППП с n_0 от 50 до до 500 изменяется от ~ 0.3 до ~ 0.03 имп.

- площадь фотопика ППП определяется активностью среды и составляет ~ 1 имп/с для ППП 1.46 мэв, ~ 0.1 имп/с для фотопиков мягких энергий, и ~ 0.01 имп/с для жестких энергий.

Полученные подстановкой этих значений в выражение для S_0 оценки τ представляются слишком оптимистичными даже для минимальных $S^2(n_0)$. Во всяком случае, обычно используемые при спектрометрии времена экспозиции $\sim 1 - 10$ мин, заведомо надежно обеспечивают калибровку спектрометрических трактов.

Непрерывная (плавающая) калибровка спектрометра позволяет устранить синхронность флуктуации собственного фона детектора (СФД), связанных с нестабильностью коэффициента усиления спектрометрического тракта прибора с характерной постоянной времени ~ 1 часа в пределах полученной ошибки определения положения ППП. При этом неконтролируемыми остаются короткопериодные флуктуации коэффициента усиления. Принцип многоканальности позволяет снизить синхронность флуктуаций СФД отдельных измерительных каналов тракта при условии идентичности и независимости каналов в тракте.

Таким образом:

- для калибровки спектрометрической или радиометрической аппаратуры не требуется (принципиально) наличия ОСГИ;

- эта процедура достаточно проста и состоит из стандартного набора статобработки экспериментальных данных [3,4];

- скважность калибровки не является ограничивающим фактором при спектрометрии морских сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукашин И. Ф., Еремеев В. Н. Геофизические аспекты формирования полей гамма-излучения морской воды, «Геофизический журнал», Киев, «Наукова думка», 1983, т. 5, № 2, - С. 82 - 87.

2. Виноградов А.С., Виноградова К.Г., особенности обработки экспериментальных гамма-спектров при исследовании радиоактивности океана. - «Морские гидрофизические исследования», Севастополь, 1969, №1(43), - С. 212 - 218.

3. Худсон Д. Статистика для физиков. Из-во «Мир», Москва, 1970, - 296 с.

4. Эфрон Б., Неторопливый взгляд на будстреп, метод складного ножа и переверку, «Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа», Москва, 1988, «Финансы и статистика», - 262 с.