

Особенности определения минимальной детектируемой активности

Минимальная детектируемая активность (МДА) – важная техническая характеристика гамма-спектрометров и радиометров, предназначенных для измерения малых количеств радионуклидов. МДА характеризует нижний порог обнаружения прибора. Однако во многих публикациях, а также в российских нормативных документах наблюдается смешивание понятия МДА с понятиями из теории точности (погрешности) измерений. Очевидно, что погрешность является отдельной интервальной характеристикой аппаратуры, не связанной напрямую с МДА. В настоящей статье сделана попытка однозначно и сравнительно просто определить понятие «МДА» на основе теории обнаружения. Приводятся методы и формулы для определения МДА гамма-спектрометра или радиометра.

Ключевые слова:

минимальная детектируемая активность, обнаружение, вероятность, радионуклиды, гамма-спектрометрия, радиометрия.

**Л.В.Викторов, Е.И.Денисов,
Г.А.Кунцевич, В.Л.Петров,
А.С.Шейн**

(Уральский федеральный университет,
г. Екатеринбург)

Понятие «Минимальная детектируемая активность» уже давно и широко используется при решении задач определения малых количеств радионуклидов (РН) в спектрометрии и радиометрии [1-6].

Важно отметить, что в настоящей статье, аналогично [2], термины «минимальная детектируемая активность» (МДА) и «минимальная измеряемая активность» (МИА) используются как синонимы, но предпочтение отдается термину «детектируемая» [1,2] как более точному, т. к. английское «*detectable*» так и переводится, как «обнаруживаемая».

Понятие МИА (МДА) закреплено и во многих российских нормативных документах. В частности, в одном из последних нормативных документах МУ 2.6.1.1981-05 [3] в разделе «Термины» дается такое определение:

«Минимальная измеряемая активность (удельная активность) – активность (удельная активность) реперного радионуклида в счетном образце, при измерении которой на данной радиометрической установке за время экспозиции один час относительная случайная (статистическая) неопределенность результата измерений составляет 50% при доверительной вероятности $P = 0,95$ ».

Из приведенного определения и из анализа статей, посвященных оценке значения МДА (МИА), видно, что вся терминология вокруг понятия «МДА» строится на основе использования терминов и понятий из теории точности измерений; одновременно не отрицается, что МДА – это некая пороговая характеристика аппаратуры, связанная с обнаружением слабого сигнала. Т. е. и в [1,2], и в многочисленных аналогичных статьях, посвященных определению МДА (МИА) [4-6], наблюдается смешивание терминов из теории обнаружения с терминами и понятиями из теории точности измерений.

С точки зрения теории обнаружения задача определения МДА – это типичная «классическая» задача обнаружения слабого сигнала на фоне шумов. (Фоновый счет в любом радиометре или спектрометрическом гамма-детекторе всегда присутствует).

А задача определения погрешностей (ошибок) измерений – это отдельная задача, решаемая методами теории измерений и не связанная напрямую с определением МДА.

Авторы работы [1], наиболее солидной из известных нам работ, посвященных обсуждаемой теме, близко подошли к использованию принципов теории обнаружения для определения МДА. Но и здесь наблюдается смешивание понятий, упомянутое выше. Что касается статьи [2], то она практически дублирует все, сказанное в [1]. Авторы [1,2], хотя и применяют многие термины из теории обнаружения, но почему-то не используют центральное в теории обнаружения понятие **отношения правдоподобия**, или эквивалентное ему понятие **достаточной статистики** [7,8].

Авторы настоящей статьи еще в 1999 г. [9], основываясь на подробнейшим образом описанной математиками теории обнаружения [7,8], подчеркивали, что наиболее информативным для решения задачи обнаружения слабых сигналов средством любого счетного

радиометра (или гамма-спектрометра) является значение **достаточной статистики**, выражаемое относительно простой формулой:

$$\eta = \frac{\bar{n} - \bar{b}}{\sqrt{\frac{\bar{n}}{t_n} + \frac{\bar{b}}{t_b}}}, \quad (1)$$

где:

η – достаточная статистика;

\bar{n} – средняя скорость счета на выходе счетного детектора при наличии контролируемого объекта в поле наблюдения детектора

$\bar{n} = N/t_n$, где N – количество импульсов, зарегистрированных за время контроля объекта t_n . Данный подход получил наибольшее применение для радиометрии. Отметим, что для гамма-спектрометрии определение МДА можно использовать только для одного радионуклида. Расчет выполняется на интервале k_a пика полного поглощения (ППП) в спектре исследуемого образца, где k_a – количество каналов АЦП спектрометра, зависящее от полуширины пика полного поглощения на полувысоте (ПШПВ, подробности – ниже). Полученные выводы можно распространить и на бета-спектрометры;

\bar{b} – средняя скорость счета фонового излучения (контролируемый объект отсутствует в поле наблюдения детектора) $\bar{b} = B/t_b$, где B – количество фоновых импульсов за время измерения t_b на том же интервале $k_f = k_a$;

\bar{n}/t_n – пуассоновская дисперсия скорости счета при контроле объекта;

\bar{b}/t_b – пуассоновская дисперсия скорости счета фонового излучения.

Разность $\bar{n} - \bar{b} = \bar{a}$ и является **сигналом**, т. е. измеряемая детектором средняя скорость счета при контроле объекта за вычетом средней скорости счета фона несет информацию о наличии либо отсутствии излучения от объекта контроля. В знаменателе формулы (1) – квадратный корень из суммы дисперсий, т. е. среднеквадратическое отклонение (СКО) сиг-

нала. Таким образом, достаточная статистика η , определяемая по (1), количественно выражает величину среднего значения сигнала, нормированную на его СКО.

Величины средних скоростей счета сигнала и фона, а также их дисперсии в формуле (1) рассчитываются исходя из предположения о пуассоновском характере распределения случайного потока импульсов на выходе детектора (статистика радиоактивного распада). Тем не менее, учитывая сравнительно большие значения времени измерения при определении МДА, можно утверждать, что эти случайные величины допустимо описывать гауссовым распределением без существенных потерь точности [1]. Таким образом, плотность распределения случайной величины η представляет собой нормализованную гауссову функцию распределения, выраженную в единицах СКО.

После вычисления достаточной статистики по (1) применяется **решающее правило**, заключающееся в сравнении статистики η с порогом q_α :

$$\eta < q_\alpha \text{ или } \eta \geq q_\alpha. \quad (2)$$

При $\eta < q_\alpha$ принимается гипотеза об отсутствии источника (радионуклида) в контролируемом объекте. При $\eta \geq q_\alpha$ принимается противоположная гипотеза о наличии источника в контролируемом объекте. Порог q_α вычисляется в так называемых «квантилях нормального распределения». Значение q_α соответствует заданной вероятности ложных тревог (ошибке первого рода) α (табл.1) и находится из таблиц значений нормальной

функции распределения. В [1,2] q_α названа «критическим порогом».

Не отвлекаясь на подробное изложение основных исходных посылок теории обнаружения, детально описанных в литературе [7,8], выделим главное:

По завершении процедуры измерения излучения от контролируемого объекта принимается либо гипотеза H_0 (отсутствие радионуклида (РН) в объекте), либо гипотеза H_1 (наличие РН в объекте). Таким образом, по завершению процедуры измерения, возможен один из четырех исходов принятия решения, для наглядности представленных в табл.1, где приводятся соответствующие термины (названия) каждого из исходов, наиболее часто употребляемые в отечественной литературе, а также обозначения вероятностей каждого из 4-х исходов.

Итак, в случае обработки гамма-спектров от слабых источников гамма-излучения задача определения МДА с позиций теории обнаружения формулируется так: «Какова минимальная, обнаруживаемая с вероятностью $P_{обн}$, скорость счета сигнала a_{min} при заданной вероятности ложной тревоги α ?». (Значение a_{min} еще принято называть пороговым сигналом).

Формула для определения порогового сигнала a_{min} выводится из (1) и (2) и принимает следующий вид:

$$a_{min} = \frac{q_p^2}{2 \cdot t_n} + q_p \cdot \sqrt{\frac{q_p^2}{4 \cdot t_n^2} + \bar{b} \cdot \left(\frac{1}{t_n} + \frac{1}{t_b} \right)}, \quad (3)$$

где $q_p = q_\alpha + q_\beta$ – сумма квантилей нормального распределения, с помощью которых

Табл.1. Термины и обозначения, используемые в теории обнаружения.

№ п/п	Описание исхода при решении задачи обнаружения	Вероятность исхода решения задачи обнаружения	
		Наименование	Обозначение
1	Верна H_0 , выбираем H_0	Вероятность правильного необнаружения	$P_0 = (1 - \alpha)$
2	Верна H_0 , выбираем H_1	Вероятность ложной тревоги (ошибка первого рода, уровень значимости критерия)	$P_{лт} = \alpha$
3	Верна H_1 , выбираем H_1	Вероятность обнаружения (мощность критерия)	$P_{обн} = (1 - \beta)$
4	Верна H_1 , выбираем H_0	Вероятность пропуска (ошибка второго рода)	β

задаются значения ошибок обнаружения 1-го и 2-го рода соответственно (q_p еще можно назвать расчетным порогом обнаружения).

Следует особо подчеркнуть, что и в исходные соотношения (1), (2) и соответственно в (3) следует подставлять не «критический порог» обнаружения q_α , а именно расчетный q_p , поскольку по (3) вычисляется значение сигнала, соответствующее вероятности обнаружения $P_{обн} = (1 - \beta)$.

Если задать, к примеру, вероятности указанных ошибок обнаружения равными $\alpha = 0,05$, $\beta = 0,05$ (что соответствует вероятности обнаружения

$P_{обн} = (1 - \beta) = 0,95$), то порог обнаружения следует установить $q_p = 1,64 + 1,64 \cong \cong 3,3$.

Учитывая, что время измерения t_n достаточно велико (обычно не менее 300 с), можно пренебречь первыми слагаемыми в формуле (3) и под радикалом, и представить (3) в упрощенном виде:

$$a_{min} = q_p \sqrt{\bar{b} (1/t_n + 1/t_b)}, \quad (4)$$

Значение среднего уровня фона \bar{b} определяется путем обработки спектра фона, измеряемого в тех же условиях, в которых измерен

Рис.1.

Спектр контрольного образца активности объемного источника гамма-излучения на основе радионуклида ^{232}Th за вычетом фона. Показан весь диапазон измерения (от 50 кэВ до 3 МэВ). Серым цветом подкрашены ППП, относящиеся к ^{232}Th (обработка программой LSRM-UGTU).

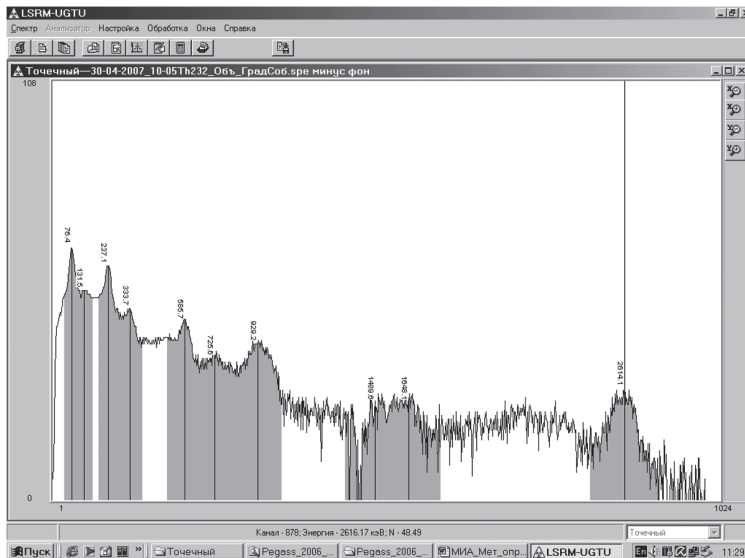


Рис.2.

Спектр фоновое гамма-излучения в том же энергетическом диапазоне. Серым цветом подкрашены участки спектра, относящиеся к ППП ^{232}Th .

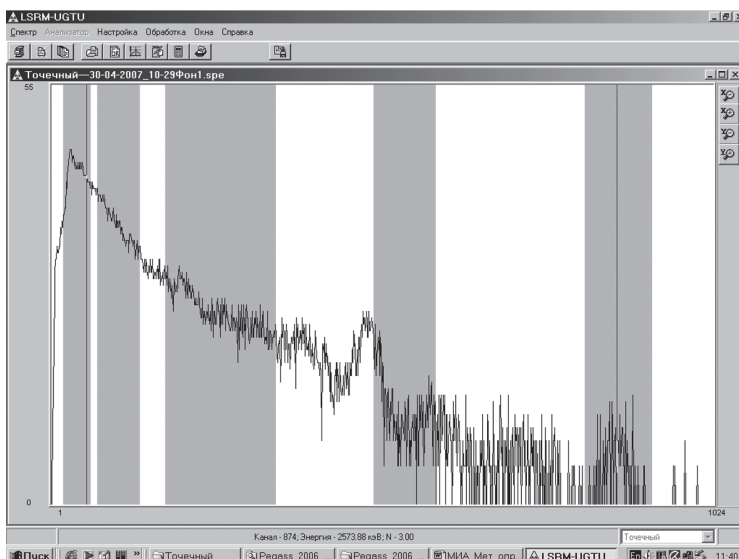


Табл.2. Результаты определения МДА для отдельных ППП ^{232}Th .

Энергия ППП, кэВ	Фон \bar{b} в зоне ППП, имп/с	K_p , имп/Бк	S_{min} , имп		МДА, Бк	
			при $t_n = t_b = 1000$ с	при $t_n = t_b = 3000$ с	при $t_n = t_b = 1000$ с	при $t_n = t_b = 3000$ с
238	1,6	0,055	186	322	3,34	1,9
581	0,534	0,011	107	186	9,78	5,6
908–960	0,661	0,0134	119	207	8,9	5,1
2614	0,063	0,0034	37	64	10,8	6,2

спектр от контролируемого объекта. Для уменьшения значения фона \bar{b} , от которого главным образом и зависит порог a_{min} , измерения малых активностей обычно проводят в низкофоновой камере. Значение интервала обработки пика полного поглощения (ППП) в каналах k_a в зарегистрированном спектре целесообразно задавать равным оптимальному значению, близкому к $3,0 \cdot \text{ППШПВ}$ (т. е. $\pm 1,5 \cdot \text{ППШПВ}$ от центра пика, где ППШПВ – полуширина на полувысоте пика, выраженная в каналах); интервал обработки фона выбирают таким же $k_f = k_a$.

Обычно время измерения спектра фона и спектра контрольного источника устанавливаются одинаковым и равным некоторому «номинальному» значению t_n . Если воспользоваться более знакомым для спектрометристов понятием «площадь пика полного поглощения», то при $t_n = t_b$ формулу (4) можно представить в простом виде:

$$S_{min} = 1,41 \cdot q_p \cdot \sqrt{B}, \quad (5)$$

где $S_{min} = a_{min} \cdot t_n$ – площадь ППП, соответствующая минимальному обнаруживаемому сигналу a_{min} ; $B = \bar{b} \cdot t_b$ – суммарный счет фоновых импульсов за время $t_b = t_n$ на интервале $k_f = k_a$, (где k_f и k_a измеряются в каналах АЦП).

Для определения значения МДА в единицах активности (Бк) необходимо измерить спектр от контрольного источника обычно сравнительно малой активности (менее 1 кБк). (Таковые контрольные источники имеются практически в каждой спектрометрической

лаборатории). Искомое значение МДА(t_n) для некоторого номинального времени измерения спектров t_n вычисляется по формуле:

$$\text{МДА}(t_n) = S_{min} / (K_p \cdot t_n), \quad (6)$$

где K_p – коэффициент регистрации, определяемый через отношение $K_p = I_c / A_c$; I_c – скорость счета в ППП от контрольного источника; A_c – активность контрольного источника, Бк.

Расчет значения МДА для иных значений времени измерения t_l выполняется по формуле перехода, легко выводимой из (4):

$$\text{МДА}(t_l) = \text{МДА}(t_n) \cdot \sqrt{t_n / t_l}, \quad (7)$$

Приведенные соотношения иллюстрируются ниже реальными примерами обработки спектров гамма-излучения.

Измерения проведены с помощью сцинтиляционного детектора на кристалле NaI-Tl 63×63 мм (Атомтех, Белоруссия) в свинцовом защитном домике с толщиной стенок 5 см. Измерения выполнены в геометрии «Дента». Активность контрольного образца объемного источника гамма-излучения на основе радионуклида ^{232}Th составляла $A_c = 425$ Бк $\pm 12\%$. Спектр фона измерялся в тех же условиях, с такой же кюветой «Дента», заполненной дистиллированной водой. Измерения выполнены при временах измерения $t_n = t_b = 1000$ и 3000 с. Спектрометрический тракт был отрегулирован таким образом, чтобы максимум диапазона энергий соответствовал $\cong 3$ МэВ (АЦП – 1024 канала).

Полученные в результате измерений спектры представлены на рис.1, 2. Обработка

спектров выполнялась средствами программы *LSRM-UGTU*.

Результаты определения значений МДА для соответствующих энергий ППП радионуклида ^{232}Th представлены в табл.2.

Заключение

Значения МДА проще и понятней определять на основе положений теории обнаружения. Важно еще раз подчеркнуть, что МДА – это пороговая характеристика аппаратуры (нижний предел регистрации малых активностей), которая зависит прежде всего от уровня фонового излучения и времени измерения,

а также от задаваемых вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода. А погрешность измерения активности пробы – это отдельная техническая характеристика спектрометра (радиометра), определяемая по совершенно иным методикам. Такой подход очевиден, и это видно из внимательного прочтения основных технических характеристик современных спектрометров и радиометров (см., например, сайт [11] с описанием гамма-радиометра РКГ-АТ1320С).

Авторы настоящей статьи полагают, что благодаря простоте предлагаемой методики определения МДА она найдет применение у спектрометристов-практиков.

Литература

1. NUREG-1507. Rev.1. Minimum Detectable Concentrations with Typical Radiation Survey for Instruments for Various Contaminants and Field Conditions. U.S.RNC: 2020. 332 p.
2. Исаев А.Г., Бабенко В.В., Казимиров А.С., Гришин С.Н., Иевлев С.М. Минимальная детектируемая активность. Основные понятия и определения // АНРИ. 2010. № 2(61). С. 15-20.
3. МУ 2.6.1.1981-05. Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов. Методические указания. 2005. 28 с.
4. Григорьев Е.И., Степанов Э.К., Фоминых В.И., Харитонов И.А., Ярына В.П. Минимальная измеряемая активность. Понятие и использование в радиометрии // АНРИ. 1994. № 3(3). С. 10-12.
5. Зубова О.Н., Федоров Г.А. Гамма-спектрометрия объектов внешней среды. Погрешность результатов и минимальная измеряемая активность // АНРИ. 1995. № 3/4(6). С. 52-58.
6. Арсаев М.И., Кладов А.В. О минимальной измеряемой активности β -спектрометров и избирательных радиометров // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 1. С. 108-111.
7. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. М.: Сов. Радио, 1972. 744 с.
8. Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А. и др. Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь, 1984. 440 с.
9. Викторов Л.В., Кружалов А.В., Шеин А.С., Шульгин Б.В., Шульгин Д.Б. Способ обнаружения слабых потоков ионизирующих излучений. Патент РФ № 2140660 от 27.10.1999.
10. Викторов Л.В., Шеин А.С., Петров В.Л., Кунцевич Г.А. Алгоритмы поиска и обнаружения слабых источников ионизирующих излучений // Сборник научных трудов. Под редакцией профессора Мильмана И.И. Екатеринбург: УрФУ, 2023. 58 с.
11. Крисмас-центр. Каталог. Гамма-радиометр РКГ-АТ1320С: <https://www.ccenter.msk.ru/cat/5874/gamma-radiometr-rkg-at1320c> (дата обращения 27.03.2023).

Peculiarities of Determining Minimum Detectable Activity

Viktorov Leonid, Denisov Evgeny, Kuntsevich Galina, Petrov Vladimir, Shein Aleksandr
(Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia)

Abstract. Minimum Detectable Activity (MDA) is an important technical characteristic of gamma spectrometers and radiometers designed to measure small amounts of radionuclides. MDA describes the instrument's lower detection threshold. However, in many publications, as well as in Russian normative documents, there is a mixing of the notion of MDA with notions from the theory of accuracy (error) of measurements. Obviously, the error is a separate interval characteristic of the instrument, not directly related to the MDA. In the present paper an attempt is made to unambiguously and relatively simply define the concept of «MDA» on the basis of the theory of detection. Methods and formulas for determining the MDA of a gamma spectrometer or radiometer are given.

Key words: *minimum detectable activity, detection, probability, radionuclides, gamma-spectrometry, radiometry.*

*Л.В.Викторов (к.ф.-м.н., с.н.с.), Е.И.Денисов (профессор, д.т.н., доцент),
Г.А.Кунцевич (н.с.), В.Л.Петров (к.х.н., с.н.с., доцент), А.С.Шейн (н.с.) – Уральский
федеральный университет, г. Екатеринбург.*

Контакты: lvictorov41@gmail.com.