

ПРИМЕНЕНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ГАММА-РАДИОМЕТРА РК-АГ-02М НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО МОНОКРИСТАЛЛА СИЛИКАТА ГАДОЛИНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ АМЕРИЦИЯ-241 В ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ ПРОБАХ РАЗЛИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ

*В.Д. Рыжиков, Б.В. Гринев, Е.Н. Пирогов, Г.М. Онищенко, Е.К. Лисецкая,
А.И. Иванов, В.Р. Евсеев, С.В. Шевченко*

*Научно-технологический центр радиационного приборостроения НТК «Институт
монокристаллов» НАНУ, г. Харьков, Украина*

Для измерения активности изотопа ^{241}Am в пробах грунта чернобыльского происхождения без их концентрирования и применения радиохимической обработки при высоком уровне помех (в $10^2 \dots 10^3$ раз превышающих активность ^{241}Am) от сопутствующих радионуклидов (^{137}Cs и др.) использовался усовершенствованный по сравнению с предыдущими модификациями избирательный гамма-радиометр РК-АГ-02М. Для повышения точности измерения в диапазоне насыпной плотности $0,6 \dots 2,5 \text{ г/см}^3$ радиометр предлагается калибровать с помощью калибровочных источников, приготовленных на основе реальных проб грунта. Также получена поправочная зависимость для чувствительности радиометра, учитывающая самопоглощение излучения в пробе с привлечением реальных коэффициентов ослабления гамма-квантов для $E=59,5 \text{ кэВ}$ для специально приготовленных образцов грунта различной плотности.

ВВЕДЕНИЕ

Избирательный гамма-радиометр РК-АГ-02 [1-5] используется в Чернобыльской зоне для обнаружения трансуранового радионуклида ^{241}Am и генетически связанных с ним изотопов ^{239}Pu и ^{241}Pu . В этом радиометре для измерения малых активностей трансуранового изотопа ^{241}Am в пробах грунта чернобыльского происхождения используется сцинтилляционный блок детектирования на основе сцинтиллятора из монокристалла силиката гадолиния (GSO:Ce). Радиохимическая обработка проб или их концентрирование при использовании этого прибора не являются необходимыми даже при высоком уровне помех (в $10^2 \dots 10^3$ раз превышающих активность ^{241}Am) от сопутствующих радионуклидов (^{137}Cs и др.). Активность ^{241}Am оценивается по интенсивности гамма-линии с энергией $E=59,5 \text{ кэВ}$. Алгоритм радиометра предусматривает трехканную регистрацию излучения в достаточно широкой области рентгеновского диапазона $\sim 15 \dots 200 \text{ кэВ}$.

Проведено усовершенствование избирательного гамма-радиометра РК-АГ-02М по сравнению с предыдущими модификациями [1, 5]. Размеры сцинтиллятора ($\varnothing 45 \times 5 \text{ мм}$) оптимизированы исходя из максимального отношения сигнал/помеха и минимального использования материала дорогостоящего монокристалла GSO. Чувствительность (а значит, и экспрессность измерений) прибора РК-АГ-02М повышена в ~ 2 раза вследствие улучшения конструкции детектора и геометрии расположения пробы, модернизации кюветы и замены верхней крышки рабочей кюветы лавсановой пленкой. Это позадило

существенно увеличить эффективный угол облучения детектора, улучшить светособирание, уменьшить поглощение излучения в конструктивных элементах. В настоящее время МДА мобильного варианта РК-АГ-02М с собственной защитой массой 5 кг составляет $\sim 25 \dots 30 \text{ Бк/кг}$ за 40 мин вместо имевшей место 50 Бк/кг .

Для повышения надежности, термостабильности, мобильности, компактности, уменьшения веса и энергопотребления, улучшения загрузочных характеристик радиометра, в частности, электронного субблока сцинтилляционного блока детектирования, существенно усовершенствована схемотехника прибора.

Разработан новый встроенный малогабаритный регулируемый высоковольтный преобразователь напряжения для ФЭУ ($\pm(10 \dots 12) \text{ В} \rightarrow$ минус $500 \dots 1500 \text{ В}$) с температурно-стабильной цепью обратной связи, выходной ток $0 \dots 2 \text{ ма}$, величина пульсаций до 10 мВ , рабочий диапазон температур $20 \dots +75^\circ\text{C}$).

Для повышения загрузочных характеристик радиометра ($\pm 10 \text{ тыс. до } \sim 70 \dots 100 \text{ тыс. имп./с}$), уменьшения фактора шума в результате оптимального формирования сигнала, улучшения температурной стабильности базовой линии спектрометрического тракта создан новый неперегружаемый малогабаритный спектрометрический усилитель на операционных усилителях ($2 \text{ платы } \varnothing 48 \text{ мм}$) с активными фильтрами (1-кратное дифференцирование и 5-кратное интегрирование). Для питания усилителя используется также встроенный в электронный субблок вторичный преобразователь напряжения ($10 \dots$

12) В → +15, -15 В на интегральном ШИМ-контроллере.

Кроме того, добавлен отдельный каскад для компенсации температурного дрейфа базовой линии, выполненный на операционном усилителе с низким температурным дрейфом выходного сигнала. Форма выходного спектрометрического сигнала усилителя – квазигауссиан, время нарастания – 1 мкс, время спада – 1,5 мкс, выходное напряжение – 5 В на нагрузке 50 Ом, температурный дрейф базовой линии – не более 5 мкВ/°С, рабочий интервал температур – 20...+70°С, перегрузочная способность по амплитуде – не хуже 300.

1 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе мы также представляем метод получения корректирующей функции, описывающей ослабление излучения с энергией $E=59,5$ кэВ в зависимости от плотности измеряемого образца для трехконного избирательного радиометра РК-АГ-02М. Кроме того, предлагается для радиометров рентгеновского диапазона приготавливать качественные и сравнительно недорогие калибровочные источники различной плотности на основе реальных проб грунта чернобыльского происхождения, имеющих в своем составе изотоп ^{241}Am .

В связи с тем, что толщина пробы в измерительной кювете радиометра составляет $x=3$ см, дополнительная погрешность в результате поглощения низкоэнергетического гамма-излучения в материале пробы, возникающая при измерении активности образцов грунта в интервале насыпной плотности $0,5...2,5$ г/см³, и особенностей трехконного алгоритма работы радиометра в значительной степени оказывается зависящей от величины плотности пробы. Эта погрешность имеет минимальное значение (~5...10%) в точке калибровки радиометра при значении плотности калибровочных источников $\rho \sim 0,8$ г/см³. Такую плотность имеют калибровочные источники ^{241}Am , $^{241}\text{Am}+^{137}\text{Cs}$, ^{22}Na , изготовленные на основе ионообменных смол и служащие для определения так называемых коэффициентов формы спектра [5].

Без учета самопоглощения излучения в пробе дополнительная погрешность многооконного радиометра, работающего в рентгеновском диапазоне, может достигать величины 200...300 % в случае достаточно широкого рабочего интервала плотностей ($0,5...2,5$ г/см³). Эта погрешность обусловлена:

- поглощением излучения в пробе, имеющей конечную толщину;
- различием коэффициентов поглощения регистрируемых рентгеновских квантов для проб различной плотности;
- различием коэффициентов поглощения для калибровочных источников, изготовленных на основе ионообменных смол и реальных проб такой же плотности в связи с различием их химического состава;

- значительной чувствительностью многооконного алгоритма работы радиометра к рассеянным рентгеновским квантам, относительная загрузка которыми рабочих окон радиометра может изменяться в зависимости от насыпной плотности измеряемого образца.

Для снижения погрешности, обусловленной поглощением излучения в измеряемом образце, и повышения точности измерения активности ^{241}Am в пробах грунта в диапазоне насыпной плотности $0,5...2,5$ г/см³ показания радиометра корректируются с помощью экспериментально измеренного набора отношений A_i/A_{i0} активностей проб по ^{241}Am на поверхности “толстых” образцов A_i к соответствующим истинным активностям ^{241}Am в образце A_{i0} как функции плотности образцов ρ_i (так называемый “реальный” метод). Эта функциональная зависимость определяется с помощью набора калибровочных образцов, приготовленных на основе реальных чернобыльских радиоактивных проб грунта, содержащих ^{241}Am и ^{137}Cs . Отношение активностей ^{241}Am к ^{137}Cs достигало 1:100 и более.

Калибровочные образцы (так же, как и измеряемые пробы) различной плотности для радиометра РК-АГ-02М имели объем ~50 см³. Активность содержащегося в исходном грунте ^{241}Am заранее измерялась в “тонкой” геометрии (толщина пробы ~ 2 мм) с помощью полупроводникового Ge(Li)-спектрометра гамма-излучения с погрешностью не более ~2 %. Затем из этого же грунта приготавливались “толстые” калибровочные образцы с уже известной активностью ^{241}Am . На основе измерений активности этих “толстых” образцов с помощью радиометра РК-АГ-02М и была определена функциональная зависимость коэффициента чувствительности радиометра от плотности изготовленных калибровочных образцов.

В качестве исходного материала для приготовления калибровочных образцов использовался гомогенизированный радиоактивный грунт из Чернобыльской Зоны отчуждения с исходной плотностью ~1,6 г/см³. В качестве добавки к нему использовалась мелкозернистая древесная пыль (химический состав, в основном, углерод, плотность ~0,25 г/см³) и мелкодисперсный электрокорунд (химический состав – Al_2O_3 , плотность ~1,9 г/см³). Выбор материала добавки определялся исходя из наилучшего приближения его химического состава к химическому составу реального грунта и максимальной близости значения эффективного атомного номера Z .

Для повышения надежности результатов измерений, а также для выявления возможности получения функциональной зависимости коэффициента чувствительности радиометра от плотности калибровочных образцов более дешевым методом, отношение измеренной активности пробы A_i по ^{241}Am на поверхности “толстого” образца к истинной активности ^{241}Am в образце A_{i0} определялось другим путем, – так называемым

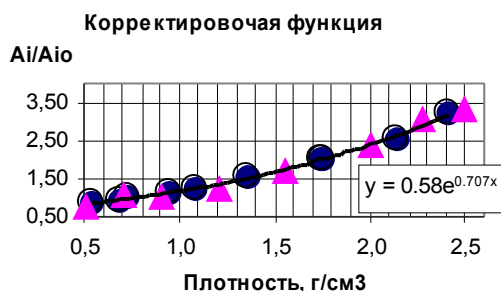
“непрямым” методом с привлечением стандартных образцовых гамма-источников.

Для этого измерялись коэффициенты поглощения гамма-квантов μ_i для стандартного источника ^{241}Am в нерадиоактивных образцах грунта такого же химического и физического составов и в том же самом диапазоне плотностей $\rho \sim 0,5 \dots 2,5 \text{ г/см}^3$. Образцы грунта находились в кюветах, у которых дно и крышка изготовлены из лавсановой пленки толщиной 100 мкм. Измерительная кювета находилась между источником и детектором.

Далее, с помощью радиометра РК-АГ-02М измерялись активности A_i радиоизотопа ^{241}Am без корректировки на самопоглощение в “толстых” радиоактивных образцах различной плотности.

По известной формуле $A_i/A_{i0} = (1 - \exp(-\mu_i x)) / \mu_i x$ рассчитывались активности изотопа ^{241}Am A_{i0} в “толстых” радиоактивных образцах толщиной x как функция экспериментально измеренных коэффициентов поглощения μ_i и активностей A_i на поверхности пробы.

На рис. 1 приведены полученные этими двумя способами отношения A_i/A_{i0} как функции плотности пробы и их аппроксимация – корректировочная функция.



Зависимости A_i/A_{i0} , учитывающие самопоглощение в пробе в зависимости от плотности, полученные двумя различными методами, и корректировочная функция – их аппроксимация Δ – “реальный” метод, \bullet – “прямой” метод)

В качестве примера в таблице представлены результаты измерений реальных чернобыльских проб, выполненные с помощью радиометра РК-АГ-02М с коррекцией на самопоглощение в образцах различной плотности.

Результаты измерений чернобыльских проб, выполненные с помощью радиометра РК-АГ-02М и Ge(Li)-спектрометра

Плотность пробы, г/см ³	Активность ^{241}Am (РК-АГ-02М), Бк/кг	Активность ^{241}Am (Ge(Li)), Бк/кг	Расхождение, %
0,94	433	498	-13,1
1,64	257	310	9,5
2,2	611	690	-8,0
	503	452	-4,3

0,94	433	498	-13,1
1,64	257	310	9,5
2,2	611	690	-8,0
	503	452	-4,3

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Различия в значениях активностей ^{241}Am в пробах, измеренные радиометром РК-АГ-02М и Ge(Li)-спектрометром, можно объяснить влиянием флуктуаций насыпной плотности пробы на коэффициент поглощения рентгеновских квантов, особенно в диапазоне малых плотностей проб (0,5... 0,9 г/см³) и неоднородностью распределения “горячих” частиц – носителей ^{241}Am в объеме пробы.

Результаты измерений указывают на возможность изготовления для радиометра рентгеновского диапазона РК-АГ-02М качественных и сравнительно недорогих калибровочных источников различной плотности на основе реальных образцов грунта из Чернобыльской зоны. С использованием таких калибровочных источников была получена корректировочная зависимость для учета самопоглощения в пробах различной плотности. Построение корректировочной зависимости также возможно с использованием образцовых стандартных источников гамма-излучения типа ОСГИ и нерадиоактивного грунта.

Для изготовления стабильных во времени имитантов проб необходимы тщательная их гомогенизация, просеивание, сушка с целью уменьшения влажности, уплотнение для обеспечения необходимой точности измерений и воспроизводимости результатов, герметизация.

Усовершенствование конструкции детектора и схемотехники прибора, введение в алгоритм обработки данных корректировки на плотность пробы позволяют снизить погрешность измерения активности ^{241}Am избирательным радиометром РК-АГ-02М в диапазоне плотностей проб 0,5...2,5 г/см³ до приемлемой величины $\sim 10 \dots 15\%$.

ЛИТЕРАТУРА

- М.Д. Бондарьков, В.А. Желтоножский, Е.Н. Пирогов и др. Альфа-гамма радиометр РК-АГ-01 на основе сцинтиллятора GSO для оперативного контроля ^{241}Am и других трансураниевых радионуклидов // Приборы и техника эксперимента. 1997, № 4, с. 121–123.
- М.Д. Бондарьков, С.Ф. Бурачас, В.А. Желтоножский и др. Применение нового сцинтиллятора силиката гадолия для

спектроскопии ядерных излучений //Тезисы докладов Международного совещания "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра" (Дубна, 20-23 апреля 1993 г.). Санкт-Петербург: Издательство института ядерной физики, 1993, с. 357.

3.М.Д. Бондарьков, В.А. Желтоножский, Е.Н. Пирогов и др. Спектрометрический сцинтиляционный блок детектирования на основе монокристалла силиката гадолиния для селективной регистрации гамма-излучения ^{241}Am и альфа-

излучения трансурановых радионуклидов //Приборы и техника эксперимента. 1996, № 3, с. 83–87.

4.С.Ф. Бурачас, Е.Н. Пирогов, В.Д. Рыжиков и др. Устройство для регистрации мягкого гамма- и альфа-излучения //Патент Украины № 15327, Бюл. "Промислова власність", 1997, № 3.

5.В.Д. Рыжиков, Г.М. Онищенко, Е.Н. Пирогов и др. Альфа-гамма радиометр-спектрометр РК-АГ-02 для оперативного контроля ^{241}Am и других трансурановых радионуклидов //Приборы и техника эксперимента. 2001, № 3, с. 122–125.

ЗАСТОСУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ВИБІРКОВОГО ГАМА-РАДІОМЕТРА РК-АГ-02М НА ОСНОВІ СЦИНТИЛЯЦІЙНОГО МОНОКРИСТАЛУ СИЛІКАТУ ГАДОЛІНІЮ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОСТІ АМЕРИЦІУ-241 У ЧОРНОБИЛЬСЬКИХ ПРОБАХ РІЗНОЇ ЩІЛЬНОСТІ

В.Д. Рижиков, Б.В. Гриньов, Є.М. Пирогов, Г.М. Онищенко, О.К. Лисецька, О.І. Іванов, В.Р. Євсєєв, С.В. Шевченко

Для вимірювання активності радіонукліда ^{241}Am у пробах ґрунту чорнобильського походження без їх концентрування та застосування радіохімічної обробки при високому рівні завад (які у $10^2 \dots 10^3$ разів перевершують активність ^{241}Am) від супутніх радіонуклідів (^{137}Cs тощо.) використовувався удосконалений (конструкція детектора, схемотехніка) у порівнянні з попередніми модифікаціями вибіркового гамма-радіометр РК-АГ-02М. Для підвищення точності вимірювань у діапазоні насипної щільності $0,6 \dots 2,5 \text{ г/см}^3$ радіометр пропонується калібрувати з допомогою калібровочних джерел, виготовлених на основі реальних проб ґрунту. Також отримана коректирувочна функція для чутливості радіометра, яка враховує самопоглинання випромінювання у пробі з притягненням реальних коефіцієнтів ослаблення гамма-квантів для $E=59,5 \text{ кеВ}$ для спеціально виготовлених зразків ґрунту різної щільності.

THE USE OF AN IMPROVED SELECTIVE GAMMA-RADIOMETER RK-AG-02M BASED ON GADOLINIUM SILICATE SCINTILLATOR SINGLE CRYSTAL FOR MEASUREMENT OF AMERICIUM-241 ACTIVITY IN CHERNOBYL SAMPLES OF DIFFERENT DENSITY

V.D. Ryzhikov, B.V. Grinyov, E.N. Pirogov, G.M. Onishchenko, E.K. Lisetskaya, A.I. Ivanov, V.R. Evseev, S.V. Shevchenko

For activity measurements of ^{241}Am isotope in soil samples of Chernobyl origin without sample concentration and radiochemical treatment and at high levels of noise ($10^2 \dots 10^3$ times higher than ^{241}Am activity) from the accompanying radionuclides (^{137}Cs , etc.), a selective gamma-radiometer RK-AG-02M has been used, which was improved as compared with previous modifications (detector design, electronic circuitry). To increase the measurement accuracy in the bulk density range of $0.6 \dots 2.5 \text{ g/cm}^3$, it is proposed to calibrate the radiometer using calibrating sources prepared on the basis of real soil samples. A correction dependence has been obtained for the radiometer sensitivity, accounting for self-absorption of the radiation in a sample using real attenuation coefficients for gamma-quanta of $E=59.5 \text{ keV}$ obtained with specially prepared soil samples of different density.