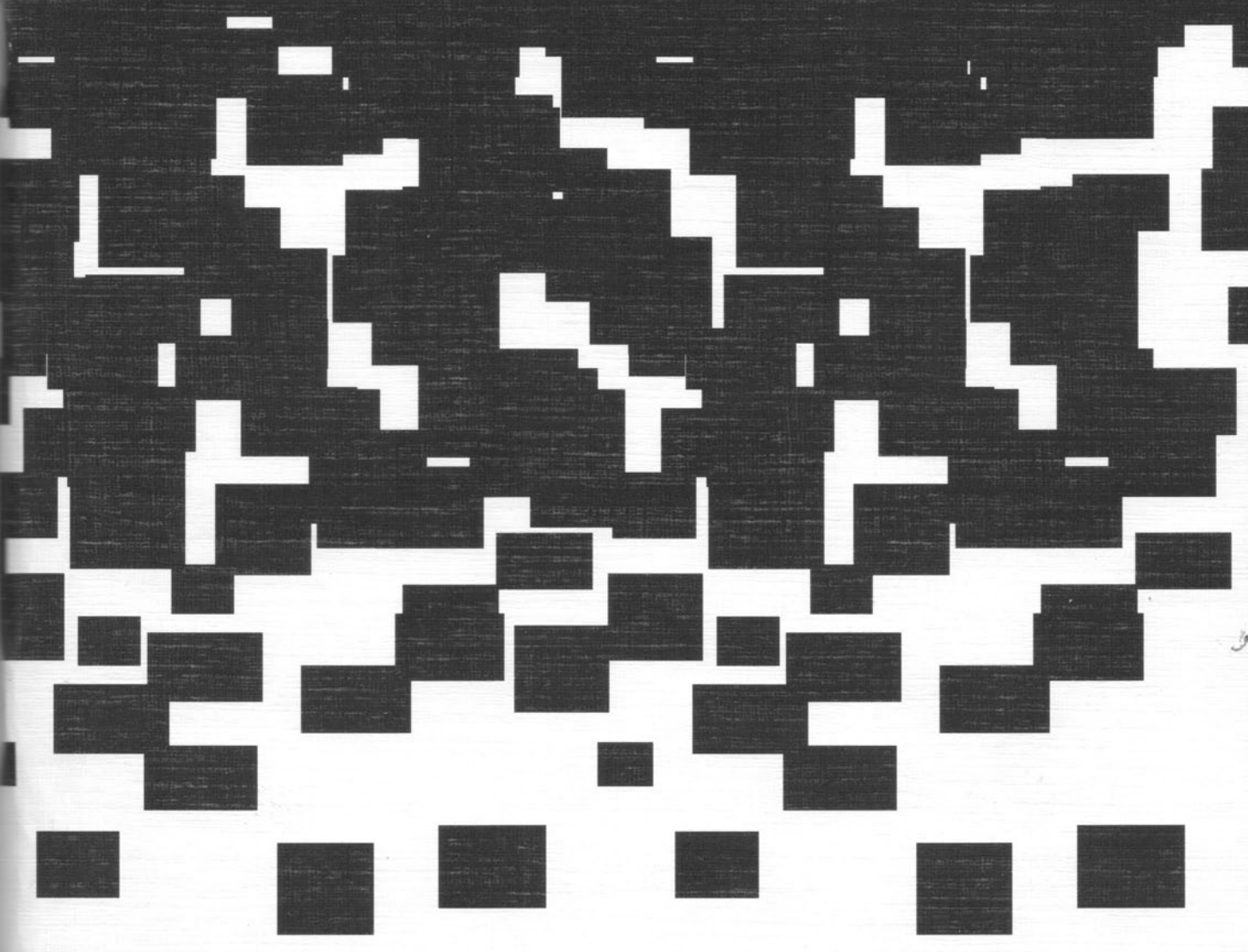


ISSN 1816-9643

ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ 2010 № 2



ЖУРНАЛ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ "МААК"

ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Научно-практический журнал
ФГУП «ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «МАЯК»
Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»

Издается с 1996 г., периодичность – 4 номера в год
№ 2 (58) 2010 г.

И.О. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА Ю.Г. МОКРОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Е.Н. Аврорин, В.В. Адушкин, Р.М. Алексахин, С.В. Баранов, В.Н. Большаков,
Л.А. Ильин, Н.П. Лавёров, Б.Ф. Мясоедов, В.И. Осипов, И.Г. Тананаев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.В. Аклеев, Г.Ш. Баторшин, В.Ф. Горн, И.А. Иванов,
Н.А. Кошурникова, В.П. Медведев, С.А. Романов,
П.М. Стукалов (отв. секретарь), В.Ф. Хохряков, В.В. Хохряков

СОДЕРЖАНИЕ

1. РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

- Кудрявцева С.П., Гелис В.М., Кузнецов Д.Г. Получение алюминатов, хромитов и ферритов РЗЭ и ППЭ с использованием органоминеральных сорбентов 3
- Бастриков В.В., Онищенко А.Д., Жуковский М.В. Многослойные трековые детекторы в задачах радиационного мониторинга альфа-излучающих радионуклидов 10
- Слюнчев О.М., Бобров П.А., Козлов П.В. Очистка растворов низкого уровня активности на опытном мембранно-сорбционном стенде 24
- Перемыслова Л.М., Костюченко В.А., Попова И.Я. Радиационно-экологическая ситуация в населенных пунктах, расположенных на реке Караболка 29
- Козлов П.В., Слюнчев О.М. Цементирование отработанных радиоактивно загрязненных масел 38

2. ОБЛУЧЕНИЕ И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

- Мокров Ю.Г. Алексахин А.И. Оценка доз внутреннего облучения, обусловленных поступлением ^{239}Pu , ^{90}Sr , ^{137}Cs в организм жителей г. Озёрска за период с 1948 по 2008 гг. 48
- Куропятенко Э.С., Черепанова Е.И., Климова Л.А., Зырянова И.Л., Дьяков А.А., Субботин Л.А., Брехман С.Е., Подчиненова Н.И. Оценка радиационного риска для детского населения, проживающего вблизи предприятия атомной промышленности. Сообщение 2. Регистр детей Снежинска 1963–1988 годов рождения 58

СОДЕРЖАНИЕ

3. ДИСКУССИОННЫЙ КЛУБ

Кононов А.Н. О перспективах применения газоторидной технологии для переработки ОЯТ на ФГУП “ПО “Маяк”	68
--	----

4. ИНФОРМАЦИЯ И ПЕРСОНАЛИИ

Пуск в эксплуатацию первой очереди общесплавной канализации	75
Вручение Премии им. В.Г. Хлопина в 2010 г.	76
Марку Львовичу Глинскому – 70 лет	77
Зайцев Борис Алексеевич (к 100-летию со дня рождения)	80
Б.В. Литвинов	83
Новые книги	87
CONTENTS	89
ABSTRACTS	91
Сведения об авторах статей	94

Журнал включен в перечень ВАК научных журналов и изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

УДК 539.1.074

© 2010

МНОГОСЛОЙНЫЕ ТРЕКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ В ЗАДАЧАХ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА АЛЬФА-ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ

В.В. Бастриков, А.Д. Онищенко, М.В. Жуковский

Россия, г. Екатеринбург, Институт промышленной экологии УрО РАН

Разработан многослойный трековый детектор для использования в различных задачах измерения активности альфа-излучающих радионуклидов. Представлены расчетные и экспериментальные данные по чувствительности детектора, описана методика использования детектора в ряде приложений: измерение поверхностной или удельной активности образцов, ретроспективная дозиметрия радона, анализ излучения аэрозольных фильтров. Разработан автоматизированный программный комплекс для моделирования отклика детектора в заданных условиях облучения. Исследованы погрешности многослойного детектора и оценена совокупная неопределенность методики измерения активности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТРЕКОВЫЙ ДЕТЕКТОР, АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЕ, РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ, ПОВЕРХНОСТНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ, РАДИОАКТИВНОСТЬ

В многочисленных задачах радиационных исследований окружающей среды возникает необходимость определять активности источников α -излучения. В последнее время особенно актуальным становится измерение низких уровней. Довольно часто продолжительность одного замера активности полученной пробы может составлять несколько дней, недель и даже месяцев. Кроме того, радионуклидный состав, геометрия источников, условия измерений и постановка задачи могут быть чрезвычайно разнообразными. В этой связи, использование электронного оборудования может быть существенно осложнено, особенно при необходимости измерения большого числа проб.

В данной работе для решения обозначенных задач предлагается использование твердотельных ядерных трековых материалов. Трековые детекторы широко используются для регистрации тяжелых заряженных частиц в радиационно-физических и радиобиологических экспериментах [1], однако в практике рутинного мониторинга α -излучающих радио-

нуклидов должного применения они пока не нашли. При этом трековые материалы обладают высокой чувствительностью к α -излучению и прозрачны по отношению к β - и γ -излучениям, что дает возможность проведения измерений в интенсивных полях смешанного излучения. Значительным преимуществом трековых детекторов является независимость фона от времени экспозиции и практическое отсутствие фединга. Трековые материалы дают возможность задания детектору произвольной площади и формы, а также установки его на изогнутых поверхностях. При измерении активности также сохраняется информация по поверхностному распределению источников. Широкое внедрение метода исследований существенно снижают себестоимость и трудоемкость отдельного измерения.

Для исследования α -излучающих радионуклидов в объектах окружающей среды в данной работе был разработан специальный детектор. Основой его конструкции является многослойная конфигурация трекового материала с узкой

энергетической чувствительностью. Слои такого детектора одновременно выполняют функции регистрирующих элементов и поглотителей, сдвигающих энергию входного излучения до попадания на следующий чувствительный слой. Такая конфигурация позволяет снизить статистическую погрешность результатов измерений, проводить энергетический анализ входного излучения, определять содержание отдельных радионуклидов в смесях и, в целом, проводить самосогласованные измерения. Достоинством детектора является и то, что отдельные чувствительные слои изначально одинаковы по фону, а после экспонирования обрабатываются в едином технологическом цикле.

В работе также создан программный комплекс MLTD (Multi Layer Track Detector), позволяющий проводить расчеты отклика многослойного детектора на воздействие образцов с различным радионуклидным составом и заданным распределением активности по глубине. Вычисления выполняются методом имитационного моделирования Монте-Карло. Для расчета прохождения α -частиц через вещество комплекс MLTD использует программный пакет SRIM-2008 [2].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве чувствительного материала детектора используется диэлектрический трековый материал LR-115, Тип 2, выпускаемый фирмой DOSIRAD, Франция. Данный материал широко применяется в отечественной практике радиационных исследований, внедрен в государственную методику выполнения интегральных измерений объемной активности радона трековым методом [3]. Трековый материал выпускается в виде активного слоя из нитрата целлюлозы красного цвета толщиной 12,8 мкм, нанесенного на прозрачную подложку из полиэстера толщиной 100 мкм. Экспонированные детекторные материалы подвергаются травлению в регламентированных условиях. В данной работе обработка материалов выполнялась в соответствии с методикой [3] в следующем режиме: длительность травления – 150 мин, температура – 50 °С, среда – 6-нормальный раствор щелочи NaOH. Такой режим обеспечивает скорость травления материала, равную

2,4 мкм/ч. Скорость травления существенно влияет на эффективность регистрации излучения, поэтому крайне важно отметить, что все описываемые ниже экспериментальные и теоретически результаты справедливы только для данных условий. Однако общий подход и разработанная методология измерений и расчетов, программный комплекс MLTD могут быть использованы для любых условий обработки.

Энергетическая и угловая зависимости эффективности регистрации α -частиц $\varepsilon(E, \theta)$ для материала LR-115 подробно исследованы в работах [4, 5]. Для аналитического описания этой зависимости используется функция:

$$\varepsilon(E, \theta) = (1 + \exp(-c_1 \eta_1) + \exp(-c_2 \eta_2))^{-1},$$

$$\eta_1 = E - c_3 + \frac{c_4 - c_5 \theta}{|c_4 - c_5 \theta|} |c_4^3 - (c_5 \theta)^3|^{1/3},$$

$$\eta_2 = -E + c_3 + \frac{c_4 - c_5 \theta}{|c_4 - c_5 \theta|} |c_4^3 - (c_5 \theta)^3|^{1/3},$$

где c_1 и c_2 задают левый и правый наклон кривой, соответственно, c_3 задает энергию, относительно которой кривая центрирована, c_4 и c_5 регулируют зависимость эффективности от различных значений угла θ . Для описанных условий обработки подобраны следующие оптимальные значения коэффициентов: $c_1 = 3,89 \text{ МэВ}^{-1}$; $c_2 = 16,2 \text{ МэВ}^{-1}$; $c_3 = 2,84 \text{ МэВ}$; $c_4 = 1,12 \text{ МэВ}$; $c_5 = 0,58 \text{ МэВ/рад}$.

Трехмерный вид энергетически-угловой зависимости эффективности $\varepsilon(E, \theta)$ с указанными коэффициентами представлен на рис. 1. В целом, материал LR-115 чувствителен к α -частицам с энергией в диапазоне от 1,7 до 4 МэВ и углом падения от 0 до 50°. При $\theta=0$ функция эффективности имеет плато в интервале энергий от 2 до 3,5 МэВ и обращается в нуль при 1 и 4,25 МэВ. С увеличением θ ширина плато уменьшается (особенно со стороны низких энергий), и кривая становится в значительной степени ассиметричной с более крутым наклоном со стороны высоких энергий. При $\theta > 40^\circ$ максимальное значение эффективности становится меньше единицы, при $50^\circ < \theta < 55^\circ$ эффективность резко падает и при $\theta=60^\circ$ практически равна нулю для любых энергий.

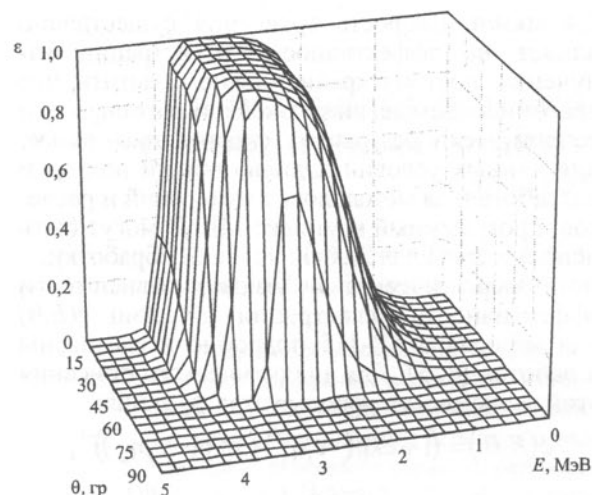


Рис. 1. Энергетически-угловая зависимость эффективности регистрации α -излучения

Многослойная конфигурация детектора позволяет значительно расширить диапазон регистрируемых энергий излучения и предоставляет дополнительные возможности для анализа результатов измерений. Для изготовления многослойного детектора чувствительный слой материала LR-115 отделяется от базовой подложки, закрепляется одним концом на картонной основе, складывается в несколько слоев и помещается в герметичный пакет достаточной толщины, исключаяющий вероятность облучения α -частицами извне. Количество слоев детектора может изменяться в зависимости от условий или требований эксперимента. При измерении активности детектор располагается непосредственно на исследуемом образце в плотном контакте и изолируется от окружающей атмосферы.

Каждый слой многослойного детектора, регистрируя излучение в узком энергетическом диапазоне, обеспечивает сдвиг энергии входного излучения в область меньших энергий, за счет чего каждый следующий слой становится чувствительным к более высокоэнергетическому излучению радионуклидов. Для описанных ранее условий травления экспонированного материала и фактической толщины слоя чувствительного материала LR-115 диапазоны чувствительности отдельных слоев оказываются оптимальными. В табл. 1 приведены интервалы

Таблица 1

Диапазоны регистрируемых энергий α -излучения ($\theta = 0^\circ$)

Номер слоя детектора	Энергия, МэВ	
	$\epsilon \geq 0,5$	$\epsilon \geq 0,05$
1	1,7–4,0	1,0–4,1
2	4,0–5,6	3,5–5,7
3	5,6–6,9	5,2–7,0
4	6,9–8,0	6,6–8,2
5	8,0–9,1	7,8–9,2

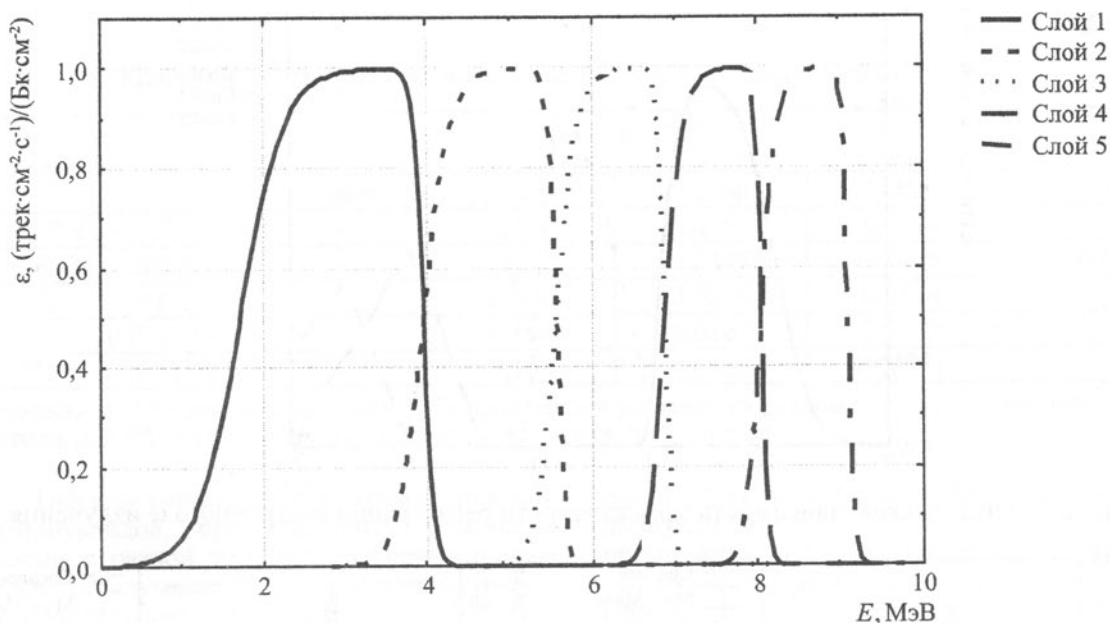
энергий направленного излучения ($\theta=0^\circ$), регистрируемого в детекторе с эффективностью не ниже 0,5 и не ниже 0,05. Как видно, диапазоны чувствительности практически не пересекаются и примыкают вплотную друг к другу, что очень удобно для энергетического анализа. Графическое представление энергетической зависимости эффективности различных слоев детектора для нормально падающего излучения показано на рис. 2.

Максимальное необходимое число слоев детектора составляет 5 и ограничивается наибольшей энергией α -излучения, испускаемой радионуклидами (8,78 МэВ для ^{212}Po). Используемое на практике число слоев обычно составляет от 2 до 4. При необходимости многослойный детектор может устанавливаться на измеряемом образце после дополнительного тонкого поглотителя для смещения диапазонов чувствительности слоев. Так, например, установка многослойного детектора с поглотителем толщиной 6 мкм параллельно с детектором без поглотителя, позволяет подробнее провести энергетический анализ входного излучения и повышает статистическую точность результатов измерений.

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ

Измерение поверхностной активности

Основной областью использования многослойных трековых детекторов является промышленный мониторинг поверхностных загрязнений α -излучающими радионуклидами.


 Рис. 2. Энергетическая зависимость эффективности регистрации α -излучения ($\theta = 0^\circ$)

Поскольку излучение радионуклидов является изотропным, эффективность многослойного детектора будет существенно отличаться от зависимости, представленной на рис. 2. Значения эффективности регистрации, проинтегрированные по углам вылета α -частиц, оказываются существенно ниже единицы. За счет частиц, проходящих через детектор под большими углами и теряющих большую часть энергии в сравнении с нормально летящими частицами, для внешних слоев детектора наблюдается сдвиг максимума эффективности регистрации детектора в сторону более высоких энергий, а также уширение спадов кривых, при этом плато практически исчезает. Зависимость интегральной эффективности регистрации от энергии излучения и номера слоя детектора показана на рис. 3. Граничные значения энергий α -частиц, регистрируемых в детекторе с различной эффективностью, приведены в табл. 2.

Активность одиночного поверхностно-распределенного радионуклида A_S определяется следующим образом:

$$A_S = \frac{N_i}{t} \cdot \frac{1}{K_e},$$

где N_i — число треков, зарегистрированных в i -ом слое детектора, чувствительного к энергии излучения конкретного радионуклида;

t — время экспонирования многослойного детектора на исследуемом образце;

K_e — поправка на эффективность регистрации излучения данного радионуклида.

Значение K_e и порядковый номер для слоя, имеющего максимальную чувствительность к излучению некоторых радионуклидов, приведены в табл. 3.

На рис. 4 представлены результаты серии экспериментов по облучению многослойных детекторов на образцах с поверхностным содержанием радионуклидов ^{239}Pu (рис. 4а) и ^{210}Po (рис. 4б). Активность образцов составляла $73,4 \text{ Бк/см}^2$ для ^{239}Pu и $3,8 \text{ Бк/см}^2$ для ^{210}Po . Как и следовало ожидать, отклик детектора сформировался только во втором слое, число треков в остальных слоях лежит на уровне фона. Расчетное значение эффективности регистрации излучения лежит в пределах доверительных границ экспериментального среднего значения.

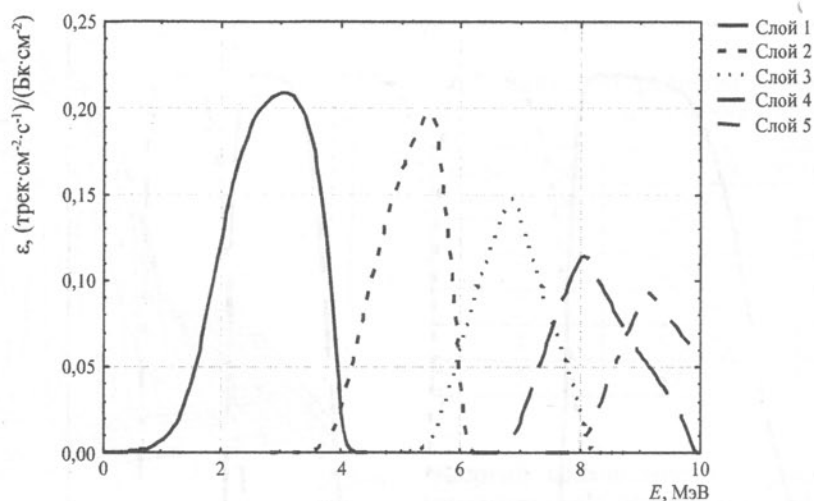


Рис. 3. Энергетическая зависимость эффективности регистрации изотропного α-излучения

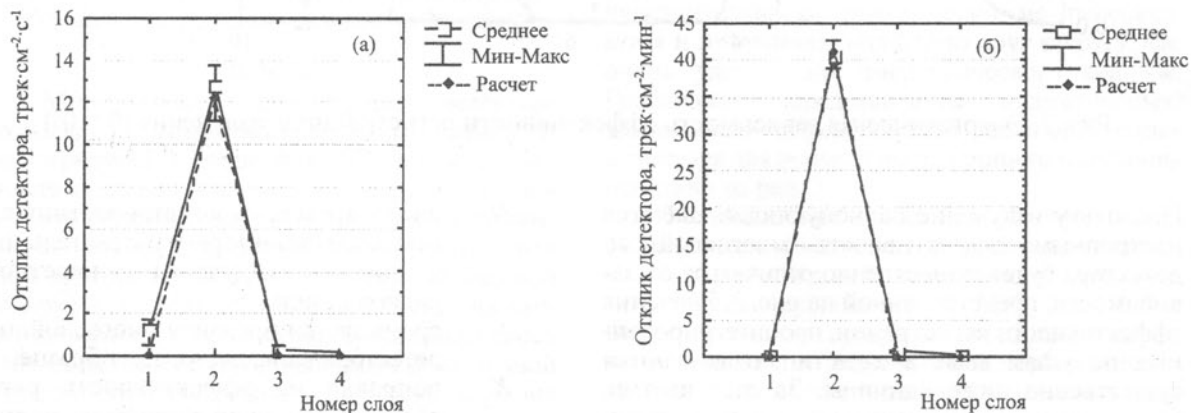


Рис. 4. Экспонирование детектора на поверхностных источниках ²³⁹Pu (а) и ²¹⁰Po (б)

Таблица 2

Диапазоны регистрируемых энергий изотропного α-излучения

Номер слоя детектора	Энергия, МэВ	
	$\epsilon \geq 0,05$	$\epsilon \geq 0,025$
1	1,6–3,9	1,4–4,0
2	4,2–6,0	4,0–6,1
3	5,9–7,8	5,7–8,0
4	7,3–9,2	7,1–9,6
5	8,6–10,2	8,3–11,0

Таблица 3

Коэффициенты K_ϵ для различных α-излучающих радионуклидов

Радионуклид	$K_\epsilon, \frac{\text{трек} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}}{\text{Бк} \cdot \text{см}^2}$	Расчет по слою
²¹⁰ Po	0,190	2
²²⁶ Ra	0,137	2
²³⁵ U	0,0847	2
²³⁸ U	0,0525	2
²³⁹ Pu	0,177	2
²⁴¹ Am	0,198	2
²⁵² Cf	0,0758	3

Таблица 4

Коэффициенты K_e для различных цепочек α -излучающих радионуклидов

Радионуклид *	$K_e, \frac{\text{трек}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}}{\text{Бк}\cdot\text{см}^{-2}}$				
	1 слой	2 слой	3 слой	4 слой	5 слой
$^{226}\text{Ra} + \text{ДПР}$	–	0,113	0,0267	0,0174	–
$^{232}\text{Th} + \text{ДПР}$	–	0,0655	0,0487	0,00806	0,00750
$^{238}\text{U} + \text{ДПР} (1:2)$	–	0,111	0,0206	0,0134	–
$^{238}\text{U} + \text{ДПР} (1:1)$	–	0,110	0,0167	0,0109	–
$^{238}\text{U} + \text{ДПР} (2:1)$	–	0,108	0,0122	0,00791	–

Примечание. * Радионуклиды ^{226}Ra и ^{232}Th приведены в условиях их равновесия с дочерними продуктами распада, для ^{238}U в скобках указан сдвиг равновесия между ^{238}U и ^{226}Ra .

При измерении поверхностной активности радионуклидов, представленных цепочками распада с разной энергией излучения членов цепочки, излучение будет регистрироваться в различных слоях детектора. Анализ отклика нескольких слоев детектора дает возможность определять активность с меньшей погрешностью, а также оценивать сдвиг равновесия между отдельными членами цепочки. Коэффициенты для некоторых цепочек радионуклидов приведены в табл. 4.

При неизвестном радионуклидном составе поверхностного загрязнения с помощью многослойного детектора можно оценить энергию α -излучения. Кроме того, метод применим для определения относительного содержания радионуклидов в смеси. Однако, для успешного разделения радионуклидов, необходимо чтобы энергия излучения разных радионуклидов попадала в диапазоны регистрации различных слоев детектора.

Измерение удельной активности

Многослойный детектор позволяет определить удельную активность радионуклидов в образцах. В данном случае излучение на поверхности образца не будет моноэнергетическим, в отличие от поверхностно-распределенных радионуклидов, за счет самопоглощения излучения в объеме. Для каждой линии энергии излучения, испускаемого радионуклидом, формируемое на поверхности распределение будет непрерывным. Пример спектра для образца с

равномерно распределенными по объему радионуклидами с энергией излучения 8,78 МэВ представлен на рис. 5. При этом, как правило, отклик многослойного детектора наблюдается в нескольких слоях.

На рис. 6 представлена энергетическая зависимость удельной эффективности регистрации излучения радионуклидов, равномерно распределенных в объеме образца. Как видно из рисунка, для каждого слоя эффективность регистрации монотонно возрастает с ростом энергии, начиная с некоторого порогового значения. Достигнув максимального значения, эффективность регистрации с дальнейшим ростом энергии не изменяется. Необходимо отметить, что численное значение максимальной удельной эффективности зависит от длины пробега α -частиц в материале образца. Приводимые здесь и далее расчетные численные значения получены для полиэтилена (плотность 0,93 г/см³, элементный состав: Н – 66,7 %, С – 33,3 %). Для другого материала конкретные численные значения могут существенно отличаться (см. рис. 7).

Анализ отклика нескольких слоев многослойного детектора позволяет провести ряд независимых измерений удельной активности, расчет по каждому слою (i) выполняется по формуле:

$$A_m = \frac{N_i}{t} \cdot \frac{1}{K_{e,m}}$$

где $K_{e,m}$ – поправка на удельную эффективность регистрации излучения.

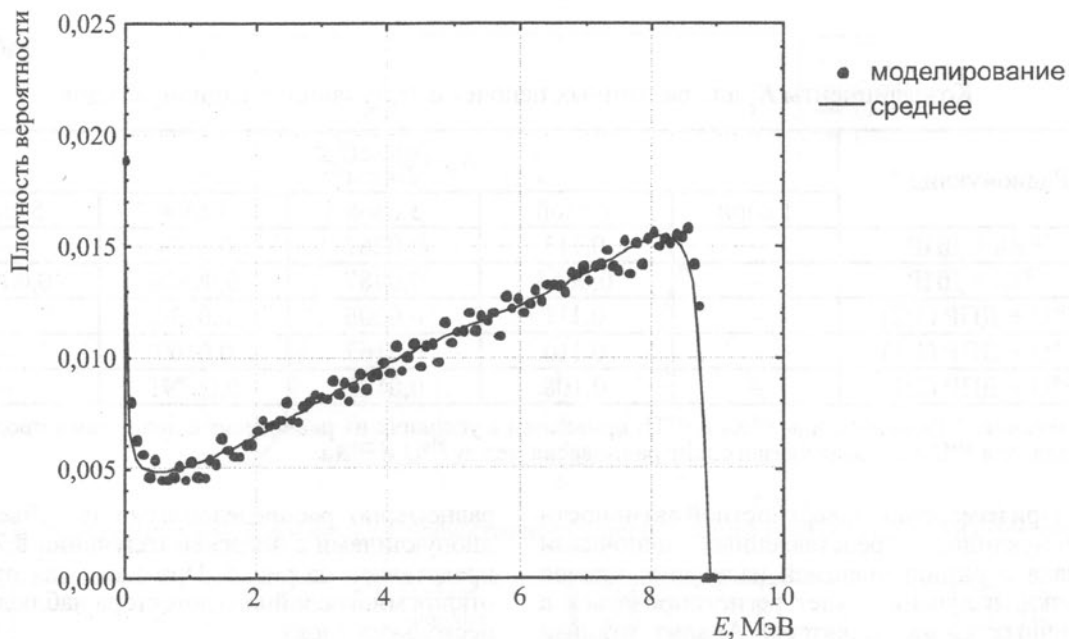


Рис. 5. Спектр излучения на поверхности образца с равномерным распределением по объему радионуклидов с энергий излучения 8,78 МэВ

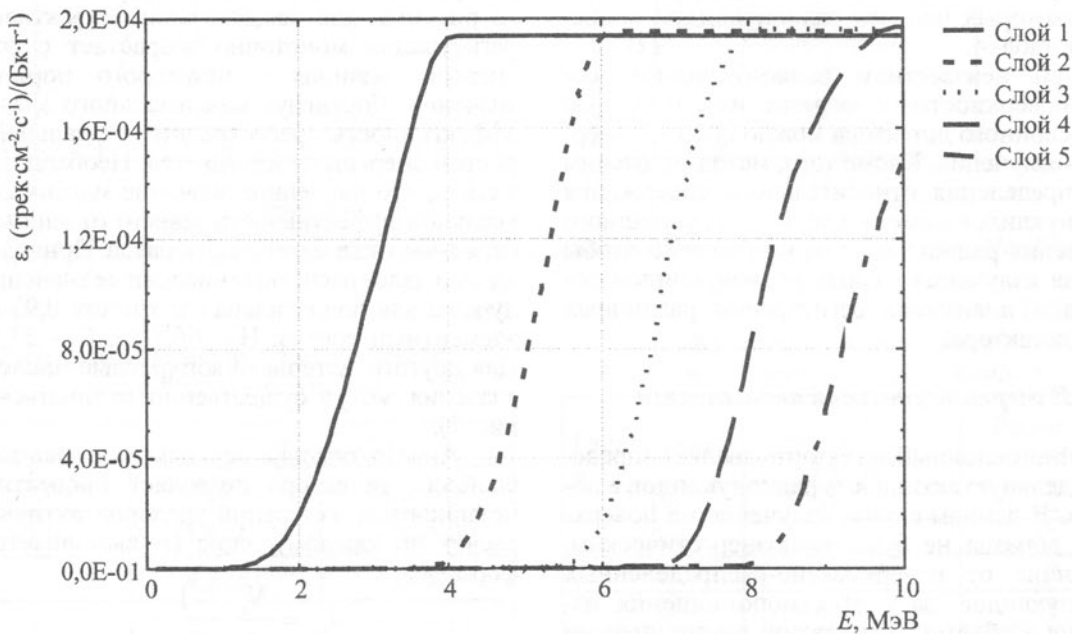


Рис. 6. Энергетическая зависимость удельной эффективности регистрации излучения радионуклидов, равномерно распределенных в образце (материал – полиэтилен)

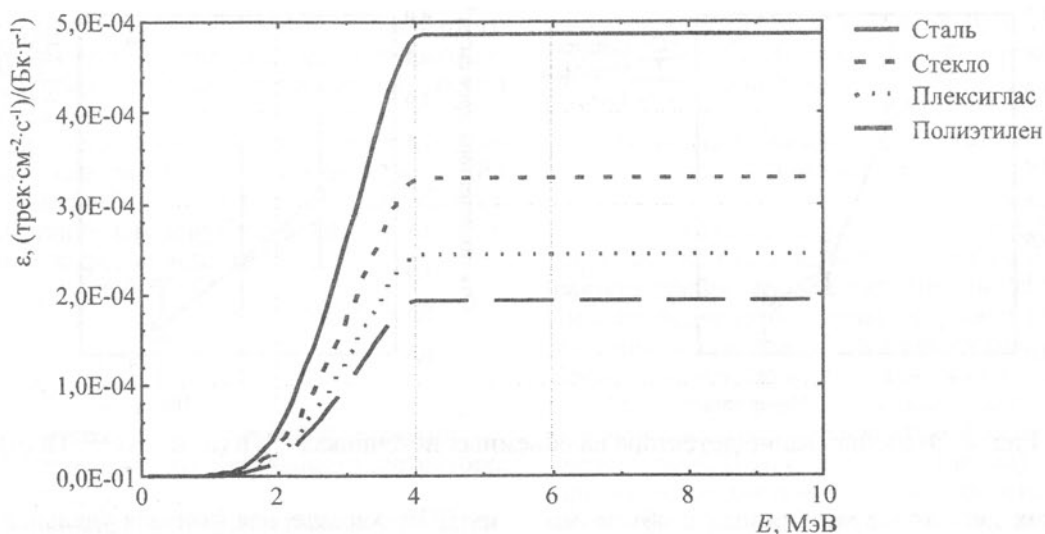


Рис. 7. Энергетическая зависимость удельной эффективности регистрации излучения в первом слое детектора для различных материалов

На практике объемно-распределенные радионуклиды обычно представлены природными долгоживущими изотопами урана и тория и их дочерними продуктами распада. Значения коэффициентов $K_{\epsilon,m}$ для различных цепочек радионуклидов приведены в табл. 5. Как видно из таблицы, первый слой позволяет определить удельную активность образца вне зависимости от радионуклидного состава, который, в свою очередь, можно проанализировать исходя из откликов последующих слоев.

С помощью многослойного детектора можно успешно решать задачу измерения по-

верхностной активности на образцах с фоновым содержанием α -излучающих радионуклидов в объеме. Кроме того, детектор может использоваться для измерения удельной активности не только при равномерном распределении радионуклидов в образце, но и для любых других распределений. При этом возможно решение обратной задачи – оценка вида распределения активности в образце с установленным радионуклидным составом. Примеры постановки и решения подобных задач описываются далее.

На рис. 8 представлены результаты серии экспериментов по облучению много-

Таблица 5

Коэффициенты $K_{\epsilon,m}$ для различных цепочек α -излучающих радионуклидов

Радионуклид *	$K_{\epsilon,m}, \frac{\text{трек}\cdot\text{см}^2\cdot\text{с}^{-1}}{\text{Бк}\cdot\text{г}^{-1}}$				
	1 слой	2 слой	3 слой	4 слой	5 слой
$^{226}\text{Ra} + \text{ДПР}$	$1,94\cdot 10^{-4}$	$1,40\cdot 10^{-4}$	$4,08\cdot 10^{-5}$	$9,17\cdot 10^{-6}$	–
$^{232}\text{Th} + \text{ДПР}$	$1,94\cdot 10^{-4}$	$1,48\cdot 10^{-4}$	$4,54\cdot 10^{-5}$	$1,72\cdot 10^{-5}$	$4,37\cdot 10^{-6}$
$^{238}\text{U} + \text{ДПР} (1:2)$	$1,94\cdot 10^{-4}$	$1,15\cdot 10^{-4}$	$3,15\cdot 10^{-5}$	$7,15\cdot 10^{-6}$	–
$^{238}\text{U} + \text{ДПР} (1:1)$	$1,94\cdot 10^{-4}$	$9,98\cdot 10^{-5}$	$2,56\cdot 10^{-5}$	$5,88\cdot 10^{-6}$	–
$^{238}\text{U} + \text{ДПР} (2:1)$	$1,94\cdot 10^{-4}$	$8,16\cdot 10^{-5}$	$1,88\cdot 10^{-5}$	$4,38\cdot 10^{-6}$	–

Примечание. * Радионуклиды ^{226}Ra и ^{232}Th приведены в условиях их равновесия с дочерними продуктами распада, для ^{238}U в скобках указан сдвиг равновесия между ^{238}U и ^{226}Ra .

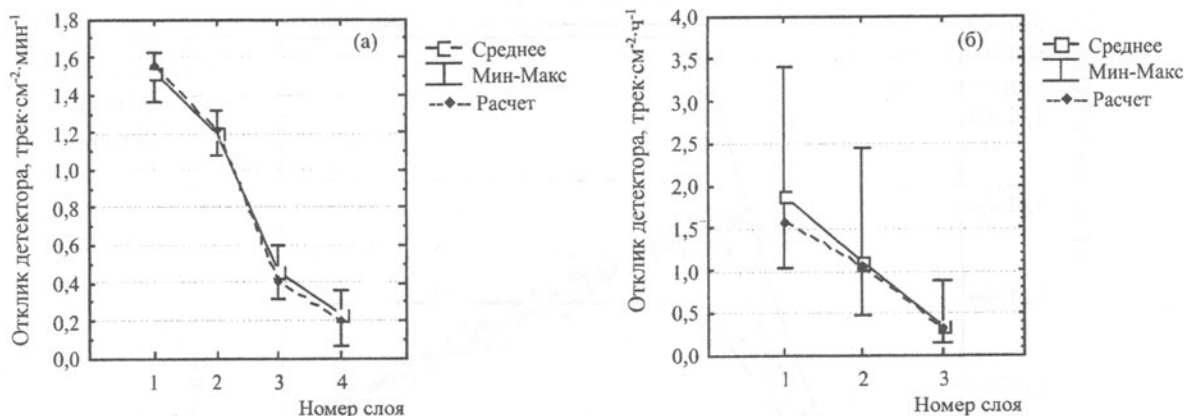


Рис. 8. Экспонирование детектора на объемных источниках ²³²Th (а) и ²³⁸U + ²³²Th (б)

слоистых детекторов на образцах с объемным содержанием природного долгоживущего радионуклида ²³²Th (рис. 8а) и природном минерале, содержащем ²³⁸U и ²³²Th (рис. 8б). Активность образцов составляла 80 и 1,5 Бк/г, соответственно. Экспериментально полученный отклик детектора хорошо согласуется с расчетными данными, а соотношение числа треков для различных слоев однозначно характеризует радионуклидный состав исследуемого образца.

Ретроспективное измерение объемной активности радона

Актуальной задачей дозиметрии природного радиоактивного газа радона является оценка средней объемной активности радона в помещении за время, предшествующее возникновению радиационно-индуцированного заболевания легких на срок от 5 до 30 лет. Для решения этой задачи предложен ряд методов [6], в наиболее перспективном из которых – методе поверхностных ловушек – анализируется накопление долгоживущего дочернего продукта распада радона ²¹⁰Po в стеклянных объектах помещения. Уровни накапливаемой за подобный срок поверхностной активности при характерных значениях объемной активности радона являются крайне малыми и составляют единицы и доли мБк/см². При этом в стеклянных объектах, как правило, содержатся природные долгоживущие радионуклиды урана и тория и

их ДПР. Характерная фоновая удельная активность стекла составляет десятки и сотни мБк/г, что в целом дает сопоставимый вклад в отклик трекового детектора в сравнении с измеряемой поверхностной активностью ²¹⁰Po.

Используемые в настоящее время трековые ретроспективные детекторы [7, 8 и др.] различаются типом трекового материала и методами анализа. Для исключения влияния фона реализуются два подхода, в одном из которых используются два различных трековых материала с разной чувствительностью к фону, в другом – параллельно устанавливается дополнительный детектор с поглотителем. При этом калибровка детекторов ведется по определенным стандартным образцам и не проводится анализа влияния на результат измерения радионуклидного состава фона и неизвестного суммарного вклада фона. В случае с несколькими типами чувствительных элементов, каждый из которых обладает собственной систематической погрешностью, общая неопределенность будет еще выше.

Описываемый в данной работе многослойный детектор лишен этих недостатков и характеризуется значительно меньшей погрешностью [9]. Излучение ²¹⁰Po регистрируется только во втором слое (см. рис. 4б), при этом провести грубую оценку вклада фона в отклик второго слоя можно по отклику первого слоя, который целиком определяется воздействием фона. Третий слой позволяет дополнительно оценить и учесть радионуклидный состав фо-

новой активности, а использование четвертого слоя делает метод измерения самосогласованным и повышает общую точность результата измерения.

При использовании двухслойного детектора поверхностная активность ^{210}Po (A_S^{Po} , мБк/см²) и удельная активность α -излучающих радионуклидов (A_m , Бк/г) определяются по формулам:

$$A_S^{\text{Po}} = \frac{6,09 \cdot 10^{-2}}{T \cdot S} (N_2 - 0,6 \cdot N_1),$$

$$A_m = \frac{3,51 \cdot 10^{-2}}{T \cdot S} N_1,$$

где N_i – число треков в i -ом слое детектора;
 T – длительность экспозиции детектора, сут;
 S – площадь рабочей поверхности детектора, см².

Для трехслойного детектора справедлива следующая система уравнений:

$$A_S^{\text{Po}} = \frac{10^{-2}}{T \cdot S} (-1,65 \cdot N_1 + 6,23 \cdot N_2 - 12,1 \cdot N_3),$$

$$A_m^{\text{U}} = \frac{10^{-2}}{T \cdot S} (7,0 \cdot N_1 + 0,32 \cdot N_2 - 28,8 \cdot N_3),$$

$$A_m^{\text{Th}} = \frac{10^{-2}}{T \cdot S} (-3,49 \cdot N_1 - 0,32 \cdot N_2 + 28,8 \cdot N_3)$$

Некоторые примеры из результатов исследования стеклянных объектов в помещениях с использованием многослойных детекторов приведены на рис. 9. Для представленных на рис. 9а и 9б распределений измеренная в объектах поверхностная активность составила, соот-

ветственно, 0,35 и 0,014 мБк/см² при удельной активности 9,7 и 50 мБк/г. Длительность экспозиции составляла 90 сут.

Измерение активности аэрозольных фильтров

Как уже отмечалось, многослойный детектор может использоваться для установления характера распределения радионуклидов по глубине исследуемого образца в случае известного изотопного состава. Примером такого использования может служить анализ излучения продуктов распада радона, накопленных на аэрозольном фильтре. Волокнистые фильтрующие материалы ФП (фильтры Петрянова) широко применяются для контроля физико-химических характеристик радиоактивных и токсичных аэрозолей и газообразных соединений. В частности, фильтры типа АФА-РСП используются для инспекционных измерений эквивалентной равновесной объемной активности радона. При этом по умолчанию считается, что эффективность улавливания аэрозольных частиц фильтром составляет не менее 0,95. Опыт показывает, что при определенных скоростях прокачки воздуха через фильтр для аэрозолей некоторых размеров эффективность сбора оказывается существенно меньшей. Многослойные трековые детекторы позволяют исследовать данные характеристики фильтра.

Для процессов осаждения аэрозольных частиц на фильтре характерно экспоненциальное распределение числа задержанных частиц по глубине. Энергетическая зависимость эф-

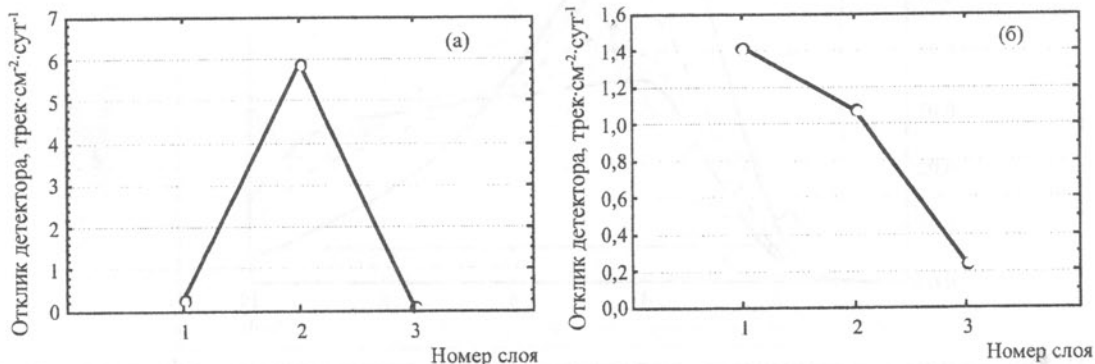


Рис. 9. Экспонирование детектора на стеклянных объектах помещений

эффективности регистрации α -излучения в слоях детектора для данного случая представлена на рис. 10. Приведенные зависимости получены для фильтрующего слоя из перхлорвинила в предположении экспоненциального распределения радионуклидов по глубине с суммарной эффективностью задержки $\eta=0,95$. Значения

эффективности регистрации приведены в расчете на интегральную активность аэрозольных частиц, задержанную по всей глубине фильтрующего слоя площадью 1 см^2 .

На рис. 11 показано изменение общего вида кривой для первого слоя для других значений эффективности задержки.

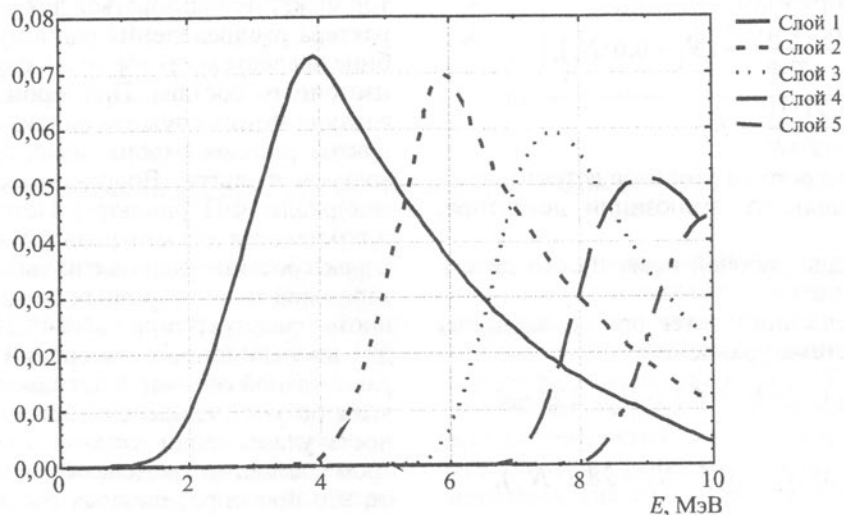


Рис. 10. Энергетическая зависимость эффективности регистрации излучения фильтра при экспоненциальном распределении радионуклидов по объему

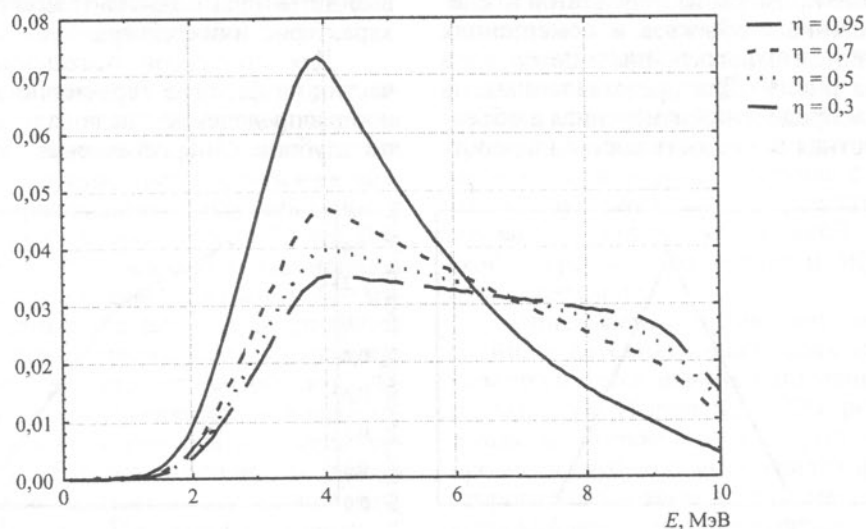


Рис. 11. Энергетическая зависимость эффективности регистрации излучения фильтра в первом слое детектора при различных эффективностях задержки аэрозольных частиц

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС MLTD

Для моделирования различных вариантов использования многослойного детектора, планирования эксперимента, прогнозирования и анализа результатов измерений был разработан программный комплекс MLTD (Multi Layer Track Detector). Общий вид интерфейса программы показан на рис. 12. Комплекс позволяет задавать любые параметры исследуемого образца: радионуклидный состав, характер распределения радионуклидов по объему образца (независимо для каждого изотопа), полную или удельную активность образца, толщину образца, материал (элементный состав) и плотность. Также программа содержит библиотеку основных α -излучающих радионуклидов со значениями энергий продуктов распада и вероятностями

распада с возможностью выполнения расчетов как для одиночного нуклида, так и для одной или нескольких цепочек распада, в том числе с указанием сдвига равновесия между отдельными членами цепочки. Результатом расчета является отклик слоев многослойного детектора на заданное воздействие, возможен также графический вывод спектров излучения, формирующихся перед каждым слоем, а также вывод результатов расчета во внешний файл. Расчет выполняется методом статистических испытаний (Монте-Карло), число проводимых испытаний устанавливается пользователем. Для вычисления пробега и траектории прохождения α -частицы в веществе комплекс MLTD обращается к программному пакету SRIM-2008 [2]. Все расчетные значения, представленные в данной работе, были получены с использованием комплекса MLTD.

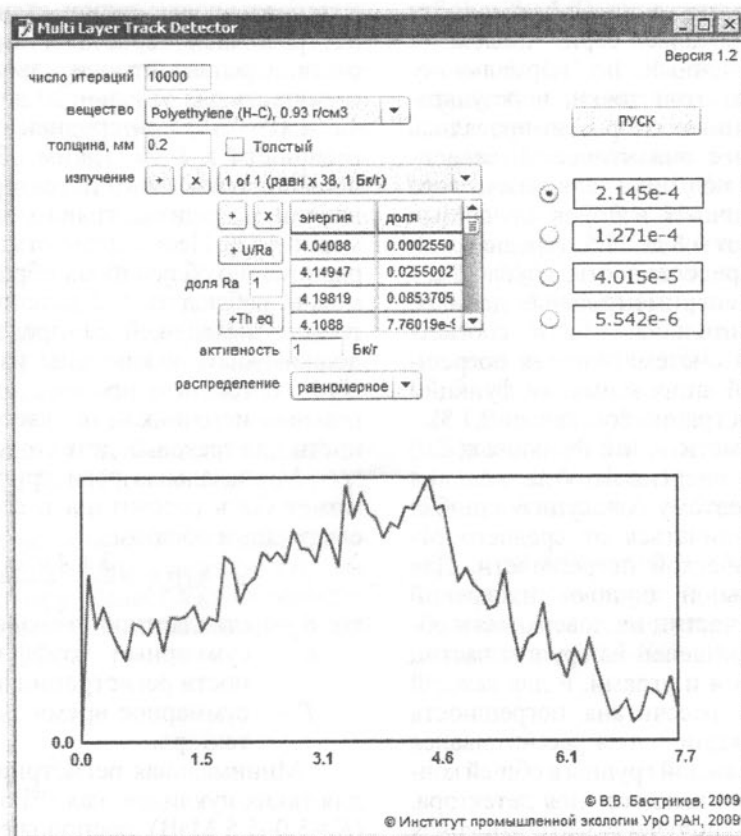


Рис. 12. Интерфейс программы MLTD

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ МНОГОСЛОЙНОГО ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА

Для разработанного метода измерения активности образцов многослойным трековым детектором характерен ряд систематических и случайных погрешностей. Одним из источников систематической погрешности детектора является неопределенность аналитической аппроксимации энергетически-угловой зависимости чувствительности материала LR-115. Источником этой неопределенности является не только подгонка коэффициентов уравнения под экспериментальные данные, но и непосредственно погрешность самих этих данных. Оценка влияния неопределенности исходных экспериментальных данных на систематическую погрешность была выполнена с использованием метода Монте-Карло: для каждого экспериментального значения эффективности регистрации генерировалась серия численных значений, распределенных по нормальному закону относительно этой точки, и результирующие наборы данных аппроксимировались представленной ранее аналитической зависимостью. Точность подгонки аналитического уравнения для различных наборов случайных значений составила от 6,8 до 11 % (среднее значение 8,8 %). Неопределенность, обусловленная неточностью экспериментальных данных, составляет приблизительно 2 %, и, соответственно, совокупная систематическая погрешность аналитической аппроксимации функции эффективности регистрации составляет 9,1 %.

Необходимо отметить, что функция $\varepsilon(E, \theta)$ сильно зависит от энергии и угла падения α -частиц (рис. 1). Поэтому совокупная ошибка измерений будет отличаться от среднего отклонения систематической погрешности. Для оценки действительной ошибки измерений суммарный поток α -частиц на поверхности образца был условно разделен на группы частиц с близкими энергиями и углами, и для каждой группы независимо рассчитана погрешность аппроксимации функции, затем рассчитывался относительный вес каждой группы в общей концентрации треков для каждого слоя детектора. Таким образом, было получено, что совокупная систематическая погрешность измерения активности образца вследствие неопределенности

эмпирической функции $\varepsilon(E, \theta)$ составляет 10 %.

Среднее число треков на экспонированном при калибровке детекторе составляет 600–2500. Таким образом, случайная пуассоновская ошибка для единичного детектора находится в пределах от 4,0 до 8,0 % ($P=0,95$). Однако разброс плотности треков для единичного детектора при калибровке существенно превышает ожидаемый уровень, характерный для распределения Пуассона. Наиболее вероятным источником подобной случайной ошибки является процесс травления, непосредственно влияющий на толщину травливаемого слоя [10]. Для оценки влияния процесса травления на непуассоновскую случайную погрешность ошибки был проведен эксперимент по облучению пленок LR-115 на источнике ^{239}Pu (около 100 детекторов). Разброс внешнего потока α -частиц находился в пределах 1 %. Облученные материалы подвергались стандартной процедуре травления, обработки и электроискрового счета. Средняя относительная случайная погрешность для отдельного детектора составила 42 % ($P=0,95$) при средней пуассоновской погрешности 5–8 %. Таким образом, случайная ошибка облученного детектора, обусловленная влиянием процесса травления, составляет примерно 40 %. Необходимо отметить, что в сериях равномерно облученных образцов (20–30 штук) можно наблюдать 1–2 детектора с плотностью треков, выходящей за пределы $\pm 3\sigma$, которые должны быть исключены из анализа. Это говорит о том, что процесс травления является главным источником непуассоновской погрешности для трековых детекторов.

Минимальная регистрируемая активность может быть рассчитана в соответствии с [11] следующим образом:

$$\text{МДА} = \frac{3 + 4,65\sigma_b}{\varepsilon T},$$

где σ_b – стандартное отклонение счета фона;
 ε – суммарный коэффициент эффективности регистрации α -частиц;
 T – суммарное время экспонирования детектора.

Минимальная регистрируемая активность для таких нуклидов, как ^{210}Po , ^{239}Pu , ^{241}Am и др. ($E_\alpha=5,0$ – $5,5$ МэВ), расположенных на нерадиоактивной поверхности, составляет ~ 15 мкБк/см² (для трех месяцев экспонирования детекто-

ра). Минимальная регистрируемая удельная α -активность находится в диапазоне от 4,7 до 9,3 Бк/кг, зависит от материала источника и практически не зависит от энергии α -частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многослойный трековый детектор на основе материала LR-115 позволяет проводить измерения активности α -излучающих источников различной природы и конфигурации. Эффективность регистрации α -излучения данным методом сравнима с эффективностью регистрации стандартной электронной радиометрической аппаратурой. В отличие от последней, фон многослойных детекторов не зависит от времени экспозиции, и в целом чувствительность позволяет регистрировать следовые загрязнения α -излучающими радионуклидами. Важнейшим преимуществом трековых детекторов является возможность проведения анализа спектра α -излучения, а также нечувствительность к другим видам излучений. Неопределенность процесса травления является наиболее существенным источником случайной погрешности при использовании многослойных трековых детекторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маренный А.М. Диэлектрические трековые детекторы в радиационно-физическом и радиобиологическом эксперименте. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 184 с.
2. Ziegler J.F., Ziegler M.D., Biersack J.P. SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter. – IBM, version 2008.04.
3. Радон. Измерение объемной активности радона интегральным трековым методом в производственных, жилых и общественных помещениях. – Методика выполнения измерений. МВИ 2.6.1.003–99. – М., 1999.

4. Marocco D., Bochicchio F. Experimental determination of LR-115 detector efficiency for exposure to alpha particles // *Radiation Measurements*. – 2001. – V. 34. – No. 1–6. – P. 509–512.
5. Damkjaer A. The efficiency of cellulose nitrate LR-115 II for alpha particle detection // *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*. – 1986. – V. 12. – No. 1–6. – P. 295–298.
6. McLaughlin J.P. Approaches to the assessment of long term exposure to radon and its progeny // *The Science of the Total Environment*. – 2001. – V. 272. – P. 53–60.
7. Falk R., Almren K., Ostergren I. Experience from retrospective radon exposure estimations for individuals in a radon epidemiological study using solid-state nuclear track detectors // *The Science of the Total Environment*. – 2001. – V. 272. – P. 61–66.
8. Steck D.J., Field R.W. The use of track registration detectors to reconstruct contemporary and historical airborne radon and radon progeny concentrations for a radon-lung cancer epidemiologic study // *Radiation Measurements*. – 1999. – V. 31. – P. 401–406.
9. Бастриков В.В., Жуковский М.В., Кружалов А.В. Метод ретроспективного определения объемной активности радона в помещении // АНРИ (Аппаратура и новости радиационных измерений). – М.: НПП “Доза”, 2005. – № 4. – С. 2–10.
10. Leung S.S.Y., Nikezic D., Leung J.K.C., Y.K.N. Sensitivity of LR-115 SSNTD in a diffusion chamber // *Nuclear Instruments and Methods In Physics Research B*. – 2007. – V. 263. – P. 306–310.
11. NUREG-1507. Minimum detectable concentrations with typical radiation survey instruments for various contaminants and field conditions. – US NRC, 1998.