

ВЕСТНИК



№5(35)

УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА - УПИ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В двух частях
Часть 2

Посвящается 55-летию юбилею
физико-технического факультета

МНОГОСЛОЙНЫЕ ТРЕКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ РЕТРОСПЕКТИВНОЙ ДОЗИМЕТРИИ ОБЛУЧЕНИЯ ДОЧЕРНИМИ ПРОДУКТАМИ РАСПАДА РАДОНА

В.В. Бастриков, М.В. Жуковский, А.В. Кружалов

Введение

Актуальность изучения влияния радона и его дочерних продуктов распада (ДПР) на человека сегодня уже ни у кого не вызывает сомнений. Широкомасштабные исследования, проведенные в 80-х и 90-х годах в Западной Европе, показали, что за счет радона формируется от 50% коллективной дозы для благоприятных регионов до 92% для регионов с повышенной радоноопасностью.

В России системный подход к проблеме вклада в дозовую нагрузку населения природного излучения, включая радон, обозначился в 1994 году с принятием Федеральной целевой программы. Наиболее серьезные исследования по радоновой проблеме проводились в С.-Петербурге (НИИ радиационной гигиены, Радиевый институт), Москве (ВНИПИ Промтехнологии) и Екатеринбурге (УГТУ-УПИ, Институт промышленной экологии УрО РАН).

В апреле 1994 года в рамках научно-технического сотрудничества между Уральским государственным техническим университетом—УПИ и Институтом промышленной экологии УрО РАН (ИПЭ УрО РАН) на кафедре экспериментальной физики УГТУ-УПИ была создана совместная лаборатория по научно-методическому и метрологическому обеспечению проблемы радона и естественных радионуклидов в Уральском регионе ("Радоновая лаборатория").

Вслед за принятием Федеральной программы лабораторией совместно с Облкомприроды и ОблЦГСЭН был разработан проект Областной программы снижения уровней облучения населения от природных источников ионизирующего излучения (программа "Радон"), утвержденный правительством Свердловской области. На русский язык переведена и издана в "Энергоатомиздате" публикация 65 МКРЗ "Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах". Совместно с Институтом промэкологии проведены многочисленные исследования в Уральском регионе и выполнена комплексная оценка радиационных рисков для населения от воздействия природных и техногенных радионуклидов, организовано пилотное исследование дозовых нагрузок от природных источников излучения в Иссык-Кульской области Киргизии, проведено комплексное обследование рабочих помещений Белоярской АЭС, ведутся совместные исследования со специалистами из Югославии, Ирландии, Бельгии, Италии, Греции и других стран.

За десять лет деятельности совместной радоновой лаборатории и ИПЭ было опубликовано две монографии по теме радона, защищено четыре кандидатских диссертации и одна докторская.

В лаборатории сформировался коллектив высококвалифицированных специалистов, а также был создан уникальный для Уральского региона приборный парк, что позволило в 1998 году совместно с УЦСМ организовать поверочную лабораторию радоновых средств измерений, являющуюся единственной в регионе.

Радоновой лабораторией ведутся научные разработки по актуальным проблемам метрологии радона и оценкам риска. В настоящее время в эпидемиологических исследованиях лимитирующим фактором является отсутствие ретроспективных данных по уровням облучения продуктами распада радона. А для онкологических заболеваний критическим по отношению к радону органа – легких – характерен длительный латентный период, и важнейшим параметром, определяющим риск, является суммарное облучение в период от 5 до 30 лет до возникновения заболевания.

Текущие уровни радона, непосредственно измеряемые в жилищах и на рабочих местах, не всегда позволяют адекватно оценить экспозицию. Общеизвестно, что уровень радона в помещении подвержен значительным вариациям – как суточным, так и сезонным. Более того, современные средне-годовые уровни радона могут существенно отличаться от прошлых вследствие разного рода модификаций в зданиях, а также отличий в условиях содержания и режимах проветривания нынешних и прежних домовладельцев. Человек может неоднократно сменить место жительства за интересующий период, и проведение измерений в каждом жилище может оказаться невозможным.

В последнее время появились методики ретроспективной оценки экспозиции по ЭРОА радона, основанные на измерении активности ^{210}Po – долгоживущего радионуклида в цепочке распада радона, который накапливается в различных предметах в жилищах. Одним из таких объектов является стекло.

Короткоживущие дочерние продукты распада радона оседают на различных поверхностях в помещении, в том числе и на стеклянных объектах. При α -распаде ^{218}Po (RaA) и ^{214}Po (RaC') ядро отдачи получает энергию 110 и 140 кэВ соответственно и может имплантироваться внутрь стекла на максимальную глубину около 100 нм. Период полураспада ^{210}Pb (RaD) составляет 22 года, и поэтому время накопления этого нуклида и дочернего ^{210}Po (RaF) соизмеримо со временем реализации радиационно-индуцированного рака легких. Таким образом, поверхность стеклянного объекта в жилище индивида являет собой "по-

верхностную ловушку" ^{210}Po и хранит в себе запись о прошлых уровнях радона, которую можно прочесть, измеряя поверхностную активность стекла.

Наиболее информативными объектами являются стекла комнатной мебели, зеркала и др., но оптимальными являются предметы личного характера с известной историей – например, стекло, покрывающее семейную фотографию. Для такого предмета довольно точно можно установить время появления в жилище, и он сопровождает человека при смене его места жительства.

Данная работа посвящена разработке ретродетектора радона на основе твердотельных ядерных трековых детекторов LR-115 и заключается в решении двух задач: создание модели, описывающей поведение радона и его ДПР в воздухе помещений и связанные с их физическими свойствами процессы оседания, имплантации и др.; и измерение слабых активностей на фоне, энергетический состав которого заранее не известен (характерные значения поверхностной активности полония составляют единицы и доли мБк/см²).

Следует отметить, что подобные разработки в России не проводились.

Модель поведения ДПР радона в воздухе помещений

В основе разрабатываемой модели лежит модель Якоби [1], позволяющая описать процессы образования ДПР радона, их взаимодействие с аэрозолями и оседание на поверхностях помещения.

После распада газообразного радона новообразованные радионуклиды, являющиеся тяжелыми металлами, немедленно вступают в реакции с газовыми примесями и воздушными парами, образуя мельчайшие частицы размером от 0,5 до 5 нм, называемые кластерами или неприсоединенными ДПР. Кроме того, продукты распада связываются с присутствующими в атмосфере аэрозольными частицами, образуя радиоактивные аэрозоли (присоединенные ДПР). Размеры этих частиц лежат в широком диапазоне от десятков нанометров до нескольких тысяч нанометров, и вид распределения активности по размеру частиц определяется аэрозольным составом воздуха в помещении.

Как свободные, так и аэрозольные ДПР радона могут оседать на стенах и других поверхностях в помещении, причем коэффициент оседания для свободных продуктов распада в среднем на два порядка выше. Различным является и коэффициент имплантации ядер отдачи в стекло, так как для присоединенных ДПР ядра отдачи испускаются с поверхности аэрозольной частицы. Поскольку среди короткоживущих ДПР радона есть два α -излучателя, то имплантированное за счет первого распада ядро при втором распаде может изменить свое положение в стекле, равно как и покинуть его.

Для каждого возможного состояния и каждого изотопа цепочки распада радона в модели составляется уравнение баланса с учетом всевозможных процессов взаимного перехода между ними. На рис. 1 приведено схематическое представление модели.

В данной работе оценка коэффициентов имплантации и обратного вылета осуществлялась с помощью моделирования процессов методом Монте-Карло. Для учета криволинейности пробега ядер отдачи в веществе и статистического разброса длины пробега траектории ядер рассчитывались в программном пакете SRIM-2003 [1]. В качестве мишени использовалось стекло стандартного состава (O – 60%, Si – 25%, Na – 10%, Ca – 3%, Mg – 1%, Al – 1%; плотность – 2,4 г/см³). Полученные численные значения коэффициентов следующие:

для свободных продуктов распада, осевших на стекло

- коэффициент имплантации ядра отдачи при распаде ^{218}Po – 0,46;
- коэффициент имплантации ядра отдачи при распаде ^{214}Po – 0,46;
- коэффициент обратного вылета имплантировавшегося ядра – 0,27;

для присоединенных продуктов распада, осевших на стекло

- коэффициент имплантации ядра отдачи при распаде ^{218}Po – 0,23;
- коэффициент имплантации ядра отдачи при распаде ^{214}Po – 0,23;
- коэффициент обратного вылета имплантировавшегося ядра – 0,26;

На рис. 2 представлены полученные в результате моделирования распределения имплантированных ядер по глубине стекла (профили внедрения), формируемые при распаде осевшего на стекло ^{218}Po (рис. 2, а) и повторном распаде имплантированного ^{214}Po (рис. 2, б). Для присоединенных продуктов распада из геометрических соображений на вероятность имплантации влияет размер аэрозольной частицы, к которой присоединился радионуклид. Проведенные оценки показали, что в интересующем диапазоне размеров (от 10 нм до 1 мкм) коэффициенты имплантации слабо изменяются, поскольку пробег ядра отдачи в воздухе составляет более 70 мкм (средние значения приведены выше).

Измерение активности стекла по полонию-210

Излучение от накопленного в стекле ^{210}Po с энергией 5,3 МэВ может быть с высокой точностью измерено с помощью поверхностно-барьерных детекторов и импульсных ионизационных камер, но их применимость в большой степени ограничена калибровочными работами. В широкомасштабных исследованиях нашли свое применение твердотельные ядерные трековые детекторы, устанавливаемые на стеклянные объекты на срок от одного до трех месяцев. Существует множество различных методик измерения поверхностной активности полония в стекле с помощью трековых детекторов, отличающихся друг от дру-

га используемым материалом детекторов (или материалами) и методами анализа.

Одним из требований, предъявляемых к детектору, является дискриминация фонового α -излучения, изначально присущего стеклу. Фоновое излучение стекла может быть обусловлено присутствием каких-либо α -излучающих природных радионуклидов – членов природных радиоактивных цепочек урана и тория. Максимальная энергия α -излучения (от ^{212}Po (ThC')) составляет 8,8 МэВ, и энергетически-угловой спектр фонового излучения является сплошным и непрерывным во всем диапазоне до этой энергии.

В данной работе ретродетектор радона разработан на основе трекового материала LR-115, производимого фирмой Kodak Pathé (Франция), – тонкой нитроцеллюлозной пленки толщиной 12,8 мкм. Принцип дискриминации фона заключается в использовании многослойного детектора. Материал LR-115 чувствителен к энергии α -излучения в диапазоне от 1,5 до 4 МэВ, поэтому первый слой не регистрирует излучение от приповерхностного полония, и его отклик целиком определяется фоном стекла. Кроме того, первый слой выполняет функцию поглотителя – за счет него снижается энергия излучения ^{210}Po и регистрируется во втором слое. Использование четырех слоев позволяет не только корректно учесть фоновое излучение, но и оценить относительное содержание элементов уранового и ториевого рядов.

Для оценки отклика многослойного детектора на воздействие приповерхностного полония-210 и фоновых радионуклидов, распределенных в объеме стекла, было проведено моделирование процессов испускания α -излучения с поверхности и по всему объему, прохождения α -частиц через слои детектора и формирования треков. Моделирование проводилось методом Монте-Карло с привлечением программного пакета SRIM-2003. Зависимость эффективности регистрации α -излучения материалом LR-115 от энергии и угла падения частицы получена экспериментально в работе [2] (рис. 3, а).

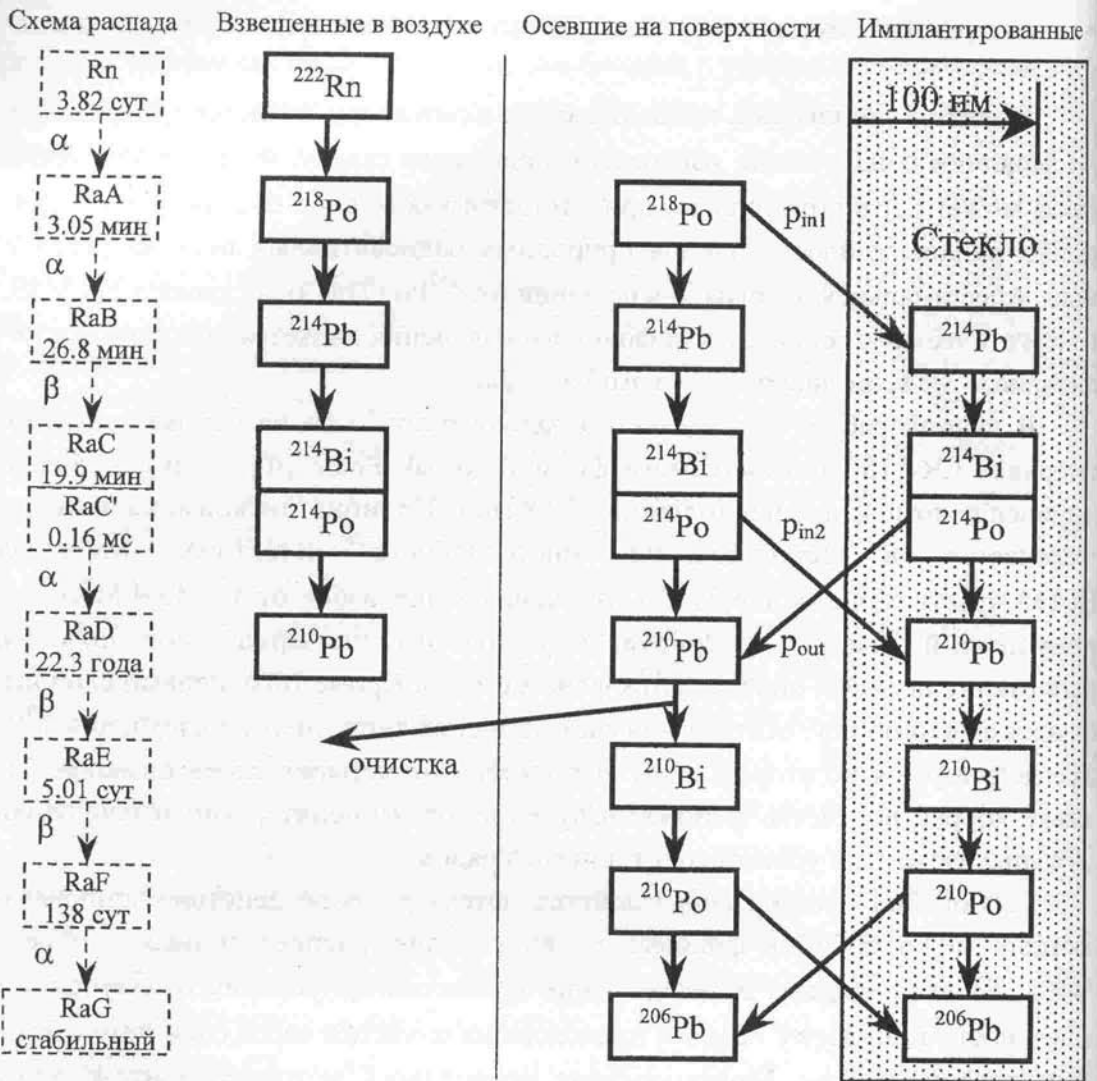


Рис. 1. Модель поведения ДПР радона в воздухе помещений

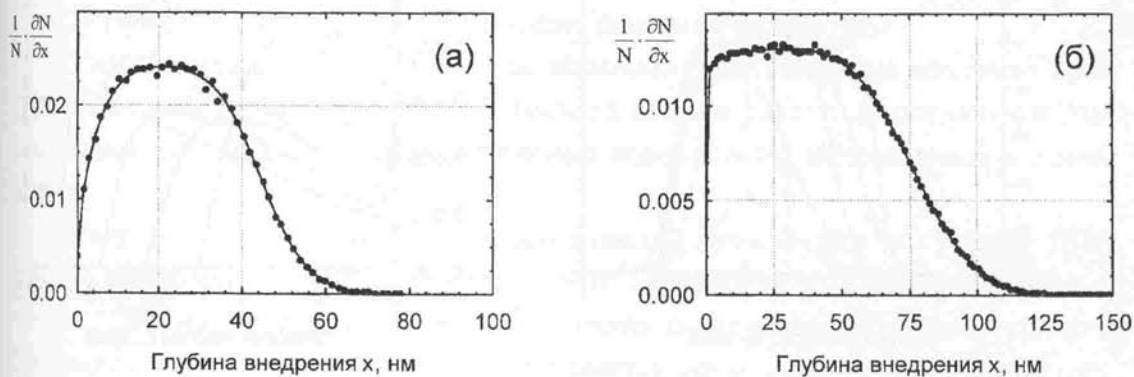


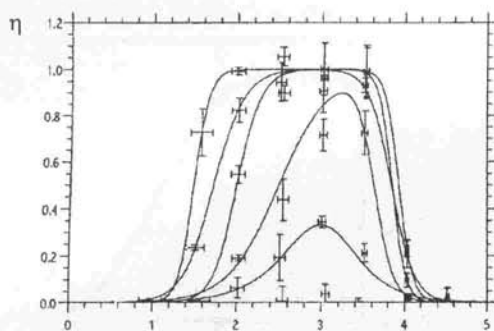
Рис. 2. Профили внедрения ядер отдачи

В таблице приведены расчетные значения скорости образования треков в слоях детектора, формируемые за счет приповерхностного ^{210}Po и объемного содержания уранового и ториевого рядов (в расчете на единичную удельную активность по всем α -излучателям цепочки). На рис. 3, б приведено энергетическое распределение плотности потока перед каждым слоем детектора для максимальной энергии фоновых излучателей 8,78 МэВ от ^{212}Po (ThC').

Как видно из таблицы, излучение от ^{210}Po регистрируется только вторым слоем. Поверхностную активность радионуклида A_{Po} , Бк/см 2 , можно найти по количеству треков на первых двух слоях

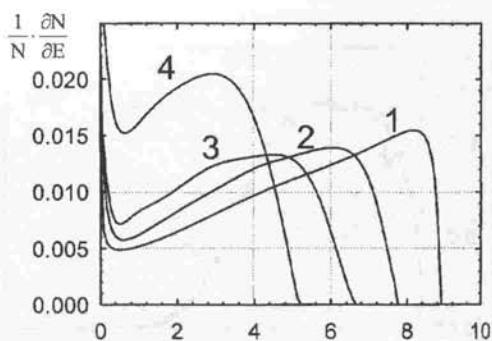
$$A_{\text{Po}} = \frac{5,32}{T \cdot S} (N_2 - 0,5 N_1),$$

где T – время, на которое был установлен детектор, с; S – площадь детектора, см 2 ; N_i – число треков в i -м слое. Погрешность, обусловленная неизвестным соотношением между удельным содержанием членов уранового и ториевого рядов, составляет при этом не более 15%.



Энергия частиц E, МэВ

а



Энергия частиц E, МэВ

б

Рис. 3. Эффективность регистрации α -излучения материалом LR-115 [2] – а, распределение плотности потока частиц на слоях детектора – б

Отклик детектора на воздействие измеряемого и фоновых радионуклидов

| Номер слоя | Скорость образования треков в слое μ , трек/см ² ·с | | | | |
|------------|--|---|----------------------|----------------------|---|
| | ²¹⁰ Po, 1 Бк/см ² | ²³⁸ U, 1 Бк/г сдвиг равновесия между U и Ra | | | ²³² Th _{eq} , 1 Бк/г |
| | | 1 | 1,3 | 0,7 | |
| 1 | $2,07 \cdot 10^{-11}$ | $3,30 \cdot 10^{-4}$ | $3,30 \cdot 10^{-4}$ | $3,30 \cdot 10^{-4}$ | $3,30 \cdot 10^{-4}$ |
| 2 | $1,90 \cdot 10^{-1}$ | $1,69 \cdot 10^{-4}$ | $1,79 \cdot 10^{-4}$ | $1,54 \cdot 10^{-4}$ | $2,49 \cdot 10^{-4}$ |
| 3 | $2,09 \cdot 10^{-3}$ | $4,19 \cdot 10^{-5}$ | $4,59 \cdot 10^{-5}$ | $3,61 \cdot 10^{-5}$ | $8,30 \cdot 10^{-5}$ |
| 4 | 0 | $8,49 \cdot 10^{-6}$ | $9,29 \cdot 10^{-6}$ | $7,31 \cdot 10^{-6}$ | $3,93 \cdot 10^{-5}$ |

По соотношению откликов трех слоев вычисляется также и удельное содержание уранового A_U и ториевого A_{Th} рядов, Бк/г:

$$A_U = (0,61N_1 - 2,43N_3) \cdot \frac{10^4}{T \cdot S};$$

$$A_{Th} = (-0,3N_1 + 2,43N_3) \cdot \frac{10^4}{T \cdot S};$$

$$A_{Po} = \frac{1}{T \cdot S} (-1,47N_1 + 5,26N_2 - 10,2N_3).$$

Наличие четвертого слоя позволяет осуществить повторную оценку содержания фоновых радионуклидов и делает метод измерения поверхностной активности ²¹⁰Po самосогласованным.

Заклучение

В работе были получены следующие основные результаты.

Разработана обобщенная модель, описывающая поведение дочерних продуктов распада радона в воздухе от распада атомов радона до оседания и имплантации ядер отдачи ДПР в стеклянные поверхности, находящиеся в помещении.

Разработан детектор для ретроспективной дозиметрии облучения ДПР радона, измеряющий малые поверхностные активности имплантированного в стекло ^{210}Po на фоне природного содержания α -излучающих радионуклидов. Особенностью конструкции детектора является использование многослойного пакета α -чувствительных трековых материалов одного типа, что значительно уменьшает влияние систематической погрешности материала.

Выполнены лабораторные испытания детектора, подтверждающие результаты расчетного моделирования.

Интеркалибровка с детекторами другой конструкции, разработанными в Университетском колледже Дублина (Ирландия), проводится в Сысертском районе Свердловской области.

-
1. Jacobi W. Activity and Potential Alpha Energy of Rn-222 and Rn-220 Daughters in Different Air Atmospheres // Health Physics. 1972. V.22, N.5. P.441-450.
 2. Marocco D., Bochicchio F. Experimental determination of LR-115 detector efficiency for exposure to alpha particles // Radiation Measurements. 2001. N. 34. P. 509-512.
 3. Ziegler J.F., Biersack J.P. SRIM – The stopping and Range of Ions in Matter.// IBM. Version 2003.10.