

Ф. Ф. Файзрахманов, А. Я. Аникин, Г. И. Антоненко,
Ю. В. Кулишов, Ф. Д. Третьяков

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ УДЕЛЬНЫХ АКТИВНОСТЕЙ ТРИТИЯ

Издательство РФЯЦ–ВНИИТФ
Снежинск • 2014

УДК 623.454.862
И 37

Измерение малых удельных активностей трития / Ф. Ф. Файзрахманов,
И 37 А. Я. Аникин, Г. И. Антоненко, Ю. В. Кулишов, Ф. Д. Третьяков; под ред. канд. биол.
наук С. А. Романова. — Снежинск: Изд-во РФЯЦ–ВНИИТФ, 2014. — 108 с., ил.
ISBN 978-5-902278-60-3

В издании представлены обобщенные материалы многолетних исследований, проведенных специалистами ПО «Маяк», РФЯЦ–ВНИИТФ и ЮУрИБФ, по разработке и внедрению высокочувствительных методов массового определения трития в практику контроля радиационной безопасности производственных помещений, дозовой нагрузки персонала и объектов окружающей среды на территориях, прилегающих к предприятиям ядерного оружейного комплекса.

Высокая чувствительность методов достигнута путем усовершенствования радиохимической подготовки образцов, разработки оптимальных способов изготовления исследуемых, рабочих и фоновых источников, создания сцинтилляционных бета-радиометров с улучшенными характеристиками. Высокие параметры бета-радиометров получены за счет конструктивных особенностей блока детектирования, выбора оптимальных геометрических размеров и материала измерительной камеры и кюветы, подбора высокоэффективных и малошумящих фотоумножителей, применения простой и надежной электронной схемы. Многие технические решения выполнены на уровне изобретений.

Книга может служить пособием для специалистов, занимающихся вопросами радиационной безопасности, для научных сотрудников, работающих в области радиэкологии, приборостроения, дозиметрии окружающей среды, для студентов и аспирантов.

УДК 623.454.862

Ответственный редактор	Т. Б. Пряхина
Редактор	Т. В. Кузнецова
Корректор	Н. И. Потеряхина
Компьютерная верстка и графика	О. В. Завьялова
Дизайн обложки	Н. Н. Шувалова

Подписано в печать 25.12.2014.
Формат 60×90 ¹/₁₆. Гарнитура TimesTenC.
Печать офсетная. Усл.п.л. 6,75.
Тираж 100 экз. Заказ №

Печать выполнена с оригинал-макета, подготовленного
информационно-издательской группой РФЯЦ–ВНИИТФ.

Адрес издающей организации:
456770, г. Снежинск Челябинской обл.
а. я. 245, ул. Васильева, 13, ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ
им. академ. Е. И. Забабахина»,
тел. (351–46) 5–23–50, 5–24–90.

ISBN 978-5-902278-60-3

© ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ
им. академ. Е. И. Забабахина», 2014

Оглавление

Предисловие	5
ВВЕДЕНИЕ	7
Глава 1	
МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ	11
1.1. Современное состояние проблемы	11
1.2. Краткий обзор методов определения трития	11
1.3. Сцинтилляционный метод на основе жидких сцинтилляторов	14
1.4. Жидкостные сцинтилляционные радиометры	18
1.5. Способы отбора и подготовки проб для определения трития	22
1.6. Выбор метода определения трития	35
Глава 2	
АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТРИТИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ	41
2.1. Обоснование направления исследования	41
2.2. Поиск путей создания высокочувствительных жидкостных сцинтилляционных радиометров	43
2.3. Отбор ФЭУ для жидкостных радиометров высокой чувствительности	49
2.4. Жидкостной сцинтилляционный радиометр с пассивной защитой РЖБ-Н2	54
2.5. Радиометрическая информационно- измерительная система «Бета 1.1»	67
2.6. Жидкостной сцинтилляционный бета-радиометр с защитным сцинтиллятором РЖБ-АС	75
Глава 3	
ИЗМЕРЕНИЕ ТРИТИЯ НА ЖИДКОСТНОМ БЕТА-РАДИОМЕТРЕ	81

3.1. Подготовка к измерению	81
3.2. Измерение на жидкостном бета-радиометре	88
3.3. Обработка результатов и расчет погрешности анализа	90
3.4. Основные характеристики измерения на жидкостных бета-радиометрах	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
Список литературы	99

Предисловие

Открытие трития и установление его способности к реакции синтеза с выделением колоссальной энергии предопределили пути использования нуклида. В условиях сложившейся международной обстановки после завершения Великой Отечественной войны, тритий в первую очередь начал использоваться для разработки термоядерного оружия. В СССР широким фронтом шла работа по разработке и совершенствованию термоядерного оружия с привлечением ведущих ученых и специалистов, с вложением колоссальных материальных средств для достижения ядерного паритета США. Холодная война спровоцировала рост числа предприятий по производству ингредиентов для водородной бомбы, создание огромного арсенала оружия колоссальной разрушительной силы и увеличение контингента специалистов, работающих с тритием.

Становление этой отрасли атомной промышленности поставило перед службами радиационной безопасности предприятий и радиационно-экологической наукой ряд задач, среди которых первостепенное значение имеют комплексное изучение механизмов распространения трития в защитном оборудовании и в производственной среде, поступления трития в окружающую среду. Важнейшими вопросами являются: изучение закономерностей поступления трития в организм контактирующего с ним персонала и оценка дозы облучения обусловленной тритием; изучение поведения трития в объектах окружающей среды, поступления и накопления его в питьевой воде и продуктах питания и, в конечном итоге, оценка дозы облучения населения, проживающего на прилегающий к предприятию территории, в результате выбросов и сбросов техногенного трития.

Проведение уникальных работ по изучению поведения трития в окружающей среде невозможно без высокочувствительных методов и приборов для измерения этого нуклида. Поэтому авторами был проведен большой объем исследований по разработке и совершенствованию методов измерения содержания трития в объектах окружающей среды. При выполнении ряда экологических исследований на фоновом для Уральского региона уровне возникла необходимость разработки новых высокочувствительных сцинтилляционных радиометров. Опыт разработки установок для измерения трития в различных объектах на производственном объединении «Маяк», разработки и многолетнего применения методов подготовки и измерения проб

в Российском федеральном ядерном центре — Всероссийском научно-исследовательском институте технической физики имени академика Е. И. Забабахина и Южно-Уральском институте биофизики нуждался в обобщении и анализе, в систематизированном изложении.

Авторами предпринята попытка изложения накопленных знаний в области радиационного контроля окружающей среды и производственных участков в виде книги, предназначенной для использования специалистами, работающими в данной области.

ВВЕДЕНИЕ

Существует три основных изотопа водорода: протий (легкий водород) — ^1_1H , дейтерий (тяжелый водород) — ^2_1H (^2_1D) и тритий (сверхтяжелый водород) — ^3_1H (^3_1T). Первые два изотопа стабильны, третий — радиоактивен.

Естественный тритий постоянно образуется в верхних слоях атмосферы под действием космического излучения. Общий непрерывно пополняющийся и расходуемый запас природного трития оценивается в пределах от $185 \cdot 10^{16}$ до $450 \cdot 10^{16}$ Бк, а общее содержание его в биосфере нашей планеты — в $65 \cdot 10^{16}$ Бк. Считается, что около 90% природного трития содержится в гидросфере, 10% — в стратосфере и 0,1% — в тропосфере. При этом около 99% трития, содержащегося в гидросфере и стратосфере, находится в виде оксида трития (НТО).

В процессе естественного обмена веществ, происходящего между внешней средой и живыми организмами, оксид трития включается в водный обмен, чем и обусловлено присутствие его в различных органах и тканях всех животных и растений. По данным Ф. М. Лясса, Ю. М. Штуккенберга и др. [1] общее содержание естественного трития во всем организме взрослого человека составляет от 4 до 500 Бк. Среднее содержание в мягких тканях — 34 Бк, в костях — 2,4 Бк. Указанное количество трития создает в мягких тканях дозу $4,5 \cdot 10^{-8}$ Зв в год. Удельный вклад трития в суммарную дозу внутреннего облучения мягких тканей и гонад от естественных нуклидов, содержащихся в организме человека, составляет 0,01%.

Начиная с 1954 г., выявлено существенное повышение содержания трития в атмосфере и гидросфере, причиной которого явились испытания термоядерного оружия. При сопоставлении результатов исследований атмосферного воздуха и воды на содержание трития до и после испытаний обнаружено увеличение концентрации нуклида в атмосфере и природных водах в 10–100 раз. Соответственно с этим возрос и удельный вклад трития в суммарной дозе естественного облучения человека.

Со времени открытия трития (1934 г.) разработано и внедрено значительное количество методов получения искусственного трития (при бомбардировке дейтронами и нейтронами мишеней из дейтерия, бора, бериллия, азота, лития и др.). В промышленных масштабах как в России, так и за рубежом тритий получают в ядерном реакторе при облучении лития нейтронами.

Современные успехи широкого использования трития в науке и технике непрерывно связаны с исследованиями физико-химических свойств указанного нуклида.

Тритий (Т) является радиоактивным изотопом водорода (Н) с массовым числом 3, ядро которого состоит из одного протона и двух нейтронов. Масса ядра трития (тритона) составляет 3,0168 массовых единиц. Средняя энергия связи частиц, образующих тритон, равна 2,71 МэВ. Радиоактивный распад трития сопровождается испусканием бета-частиц и превращением его в гелий (${}^3_2\text{He}$).

Период полураспада трития составляет 12,43 года. Средняя энергия бета-частиц трития находится в пределах от 5,5 до 5,7 кэВ, максимальная — от 17,6 до 19,0 кэВ. Из-за низкой энергии бета-частиц трития, пробег их в воздухе, тканях тела и других средах незначителен. Так, пробег бета-частиц в воздухе при температуре 20°C равен 5,4–5,8 мм, в тканях — порядка 1 мк [1–4].

Удельная радиоактивность трития составляет $36 \cdot 10^{13}$ Бк/г. Вес 1 кюри трития (без стабильного изотопа) равняется $1 \cdot 10^{-4}$ г. При нормальных условиях 1 мл чистого трития имеет активность $9,5 \cdot 10^{10}$ Бк [3, 4].

По своим химическим свойствам тритий близок к элементу, изотопом которого он является, — водороду. Химические реакции с участием трития при обычных условиях (18–20°C) протекают значительно медленнее, чем с обычным водородом (протием). В то же время если атом трития присоединится к какой-либо молекуле, то оторвать его от нее бывает довольно трудно [5–8]. Вместе с тем, газообразный тритий в отличие от газообразного водорода энергично реагирует со многими химически инертными маслами, смазками, каучуком. В ряде случаев газообразный тритий вступает в такие реакции изотопного обмена с атомами водорода органических молекул, которые с обычным водородом при одинаковых условиях никогда не происходят [5].

Тритий образует прочные связи с углеродом в большинстве органических соединений. Они не нарушаются при всевозможных химических и биологических превращениях. Необходимо отметить, что концентрированные соединения трития подвержены радиационному саморазложению под действием собственного излучения с разрывом связи между атомами водорода и углерода [5].

Тритий по аналогии с водородом вступает в химические реакции с кислородом, галогенами, серой, фосфором, другими металлоидами, а также взаимодействует с рядом металлов. В первом случае образует-

ся оксид трития (сверхтяжелая вода), во втором — водородистые соединения металлоидов и в третьем — тритиды [3,5].

По своим физическим и химическим свойствам оксид трития близок к дейтериевой и протиевой воде. Ниже приведены некоторые физико-химические характеристики окислов изотопов водорода.

Параметры	H ₂ O	D ₂ O	T ₂ O
Точка кипения, °С	100,00	101,42	101,52
Температура тройной точки, °С	0,01	3,82	4,49
Давление тройной точки, Па	610,5	669,2	649,1
Теплота парообразования при точке кипения, кДж/моль	40,8	41,5	42,4

Тритиевую воду с высоким содержанием трития используют крайне редко в связи с ее высокой удельной активностью и быстрым разложением в результате радиолиза. Для различных экспериментов обычно употребляют воду, содержащую тритий с концентрацией около 1% [3].

Из соединений трития с металлами в различных областях науки и техники наиболее широкое применение нашли тритид циркония (ZrT₂), лития (LiT), титана (TiT₂), урана (UT₃) и др. Основные физико-химические свойства тритидов даны в следующей табл. [3–6, 8]:

Параметр	Гидриды (тритиды)			
	LiH	TiH ₂	ZrH ₂	UH ₃
Вид гидрида	солеоб-разный	металли-ческий	металли-ческий	металли-ческий
Плотность, г/см ³	0,8160	3,9100	5,6700	10,9200
Объемное содержание водорода, г/см ³	0,1015	0,1394	0,1181	0,1370
Удельная активность при замене H ₂ на T ₂ , 3,7·10 ¹⁰ Бк/г	2,91·10 ³	1,·10 ³	6,0·10 ²	3,53·10 ²
Объем T ₂ связанного с 1 г металла, см ³	1,6·10 ³	4,7·10 ²	2,5·10 ²	1,4·10 ²

Окончание табл.

Температура, при которой выделяется основное количество водорода, °С	750–850	400–700	500–900	300–400
Взаимодействие с атмосферным воздухом	неустойчив, разлагается	устойчив	устойчив	неустойчив, воспламеняется
Взаимодействие с водой	то же	устойчив до 100°С	устойчив до 100°С	неустойчив, загорается