

Секция № 06 «Измерения ионизирующих излучений»

Содержание	стр.
И.А. Харитонов, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» «К столетию отдела измерений ионизирующих излучений ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»	158
И.О. Васильев, В.А. Стяжкин, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России» «Метод уменьшения составляющей погрешности измерений активности радионуклидов, обусловленной неравномерностью активного слоя источников и чувствительности детектора»	178
Р.А. Абдулов, М.Н. Гурский, А.А. Громов, И.А. Емельяненко, А.П. Жанжора, В.П. Тенишев, ФГУП «ВНИИФТРИ» «Разработка пленочного химического дозиметра для измерения поглощенных доз высокоинтенсивного ионизирующего излучения в диапазоне от 5 до 60 кГр»	183
А.Б. Рогозов, Ю.А. Тычинкин, Э.А. Титов, ЗАО «РИТВЕРЦ» «Эталоны для измерений ионизирующего излучения»	185
А.В. Берлянд, ФГУП «ВНИИФТРИ» «Применение государственного первичного эталона поглощенной дозы фотонного и электронного излучений для дозиметрии терапевтических пучков протонного излучения»	188
Р.В. Лукашевич, НПП «АТОМТЕХ» «Калибровка сцинтилляционного блока-компаратора в низкоинтенсивных полях фотонного излучения по мощности дозы»	194
В.Ю. Сухов, Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, В.А. Пospelов, ГБУЗ «Городская клиническая больница № 31» «Форсайт будущих потребностей в медицинских изотопах»	209
И.Г. Тарутин, РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова «Метрологические проблемы дозиметрии в радиационной медицине»	213
В.В. Генералова, А.А. Громов, М.Н. Гурский, А.П. Жанжора, И.А. Емельяненко, В.П. Тенишев, ФГУП «ВНИИФТРИ» «Метрологическое сопровождение радиационных технологий»	222
П.Ф. Масляев, С.Г. Федоров ФГУП «ВНИИФТРИ» «Использование сцинтиллятора на основе литиевого стекла для регистрации нейтронного излучения»	224

К СТОЛЕТИЮ ОТДЕЛА ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ВНИИМ им. Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

Харитонов И.А.

ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева»

khia@vniim.ru

Введение

1 марта 1896 г. французский физик, известный специалист в области флуоресценции минералов, Анри Антуан Беккерель, проводя исследования уранила калия в своей лаборатории, которая находилась во флигеле Ботанического сада (Jardin de Plantes) в Париже, обнаружил неизвестное собственное излучение урановой соли, не связанное с ее облучением солнечным светом. Так было открыто явление радиоактивности.

В 1898 г. Пьер и Мария Кюри, изучая радиоактивность урановой руды из Иохимсталя (Чехия), пришли к заключению о присутствии в ней какого-то элемента, обладающего очень сильной радиоактивностью, во много раз превышающей радиоактивность урана. В июле 1898 г. они сообщили об открытии нового радиоэлемента, названного ими полонием (в честь родины М. Склодовской-Кюри), а в декабре того же года – об открытии радия (вместе с Ж.Бемоном).

Д.И. Менделеев проявил живейший интерес к работам А. Беккереля и супругов Кюри в области радиоактивности, поскольку он предполагал наличие некоторых особенностей у элементов конца таблицы элементов, открытой им, и обнаружение двух новых элементов – радия и полония и изучение их свойств казалось ему очень важным [1].

В апреле 1902 г. Д.И.Менделеев приехал в Париж в связи с опытами по измерению величины силы тяжести в Международном Бюро Мер и Весов (МБМВ). Во время этой поездки он присутствовал на заседании Парижской академии наук, встречался с французскими учеными, а 29 апреля, вместе с супругами Кюри, посетил лабораторию А. Беккереля, где наблюдал явление радиоактивности и сделал об этом следующую запись в путевом дневнике:

“16/29 апреля. Вторник. В 3 ч у Беккереля (Jardin de Plantes) с M^r et M^{me} Curie. Все, что можно, радиоактивное видел. Radium=223. Очень характерно, важно, но не ясно. Отчего содействует разряду? ZnS светит от раствора. Заряжение проходит”

По возвращении из командировки Д.И. Менделеев предпринял попытку провести исследования радиоактивных свойств радия в Главной

Палате Мер и Весов. После приобретения в Германии препарата бромистого радия, Д.И. Менделеев поручил своему лаборанту М.В. Иванову исследовать способность излучения радия разряжать заряженный электроскоп с целью выяснения влияния внешних условий на разрядную способность радия.

В отчете, представленном Д.И. Менделееву, М.В. Иванов писал:

“Разрядная радиоактивность радия измерялась в следующих условиях:

- 1) радий находился в трубке под обыкновенным давлением;
- 2) радий находился в пустоте,
- 3) радий находился в пустоте и нагревался до 100 °С,
- 4) радий нагревался под обыкновенным давлением до 100 °С без высушивания,
- 5) радий подвергался сильному выслушиванию и нагреванию до 100 °С. Давление в трубке с радием после выкачивания не превосходило 0,0001 мм”.

Так начались исследования в области радиоактивности и ионизирующих излучений в Главной Палате Мер и Весов (ВНИИМ им. Д.И.Менделеева), которые продолжаются уже более 100 лет [2].

После смерти Д.И.Менделеева исследования в области радиоактивности в Главной Палате Мер и Весов были временно прекращены, однако они интенсивно проводились в других научных учреждениях России, прежде всего с целью решения задачи получения радия путем промышленной переработки отечественных урановых руд. В связи с важностью этой проблемы Министерство народного просвещения, курировавшее в тот момент это направление, в январе 1914 г. провело особое совещание, в решении которого была отмечена необходимость организации при Главной Палате Мер и Весов «специальной лаборатории для проверки качества радиевых препаратов и установления эталона для их оценки». Это решение предопределило развитие метрологических исследований в области ионизирующих излучений в Главной Палате Мер и Весов и привело к организации сначала радиологической лаборатории (1918 г.), а впоследствии-отдела измерений ионизирующих излучений (1940 г.).

В период 1914–1921 гг. в Главной Палате Мер и Весов были проведены работы по исследованию урановых руд и изготовлению источников на основе радия, которые выполнили известные радиохимики В.С. Бородавский и Л.С. Коловрат-Червинский [3], последний, в 1918 г., и возглавил созданную во ВНИИМ радиологическую лабораторию.

В истории отдела ионизирующих излучений ВНИИМ им. Д.И. Менделеева можно условно выделить три периода довоенный - 1918–1940;

послевоенный - 1944–1990;
современный - 1990–2017.

Довоенный период 1918–1940 гг.

Первые систематические исследования в области измерений ионизирующих излучений в лаборатории начались в 1921 г., после того как ее возглавил Л.Н. Богоявленский. Необходимость проведения этих исследований была обусловлена их востребованностью при выполнении измерений, осуществляемых:

- в процессе поисковых работ месторождений урана и производства радия;
- в рамках проведения медицинских процедур в рентгенографии.

В соответствии с этим в лаборатории сложились следующие основные направления деятельности, связанные с разработкой точных измерений

- активности радия в источниках с целью создания эталона единицы активности (массы) радия;
- экспозиционной дозы рентгеновского излучения с целью создания эталона единицы рентгена.

Важность создания эталона радия была осознана мировым сообществом ученых практически с момента открытия явления радиоактивности, поскольку существовала необходимость в сопоставлении результатов измерений в области радиоактивности, выполненных в лабораториях различных стран, между собою. Было необходимо выбрать измеряемые физические величины, установить единицы этих величин и создать эталоны этих единиц. Прежде всего, было решено изготовить эталонный радиевый препарат, содержащий точно известное количество (массу) этого радиоэлемента, изготовить из него определенное количество источников с известной массой радия и распределить эти источники в качестве эталонов среди национальных лабораторий.

Международный Комитет по электричеству и радиологии, собравшийся в 1910 г. в Брюсселе, поручил работу по изготовлению таких эталонов Марии Склодовской-Кюри, которую она выполнила в 1911 г. Радий для препарата был выделен из иохимстальской урановой руды и перед тем использовался М. Склодовской-Кюри для определения атомной массы радия. Одновременно с М. Склодовской-Кюри подобную работу по изготовлению эталонов радия выполнил О. Хенигшмид в Венском институте радия.

Следующая сессия Международного Комитета в 1912 г. утвердила препарат радия, изготовленный М. Кюри, в качестве первичного международного эталона, а препарат, изготовленный О. Хенигшмидом, в качестве основной копии международного эталона. Было решено также, что в дальнейшем масса радия во всех других радиевых источниках

должна определяться сравнением их по ионизационному действию гамма-излучения с эталонными источниками и выражаться в миллиграмм-эквивалентах радия.

Была образована Международная Комиссия по радиевым эталонам, в состав которой вошли: Э. Резерфорд (председатель), М. Кюри, Ст. Мейер, А. Дебьерн, Ф. Содди, О. Ган и Э. Швейдлер. Эта Комиссия распределяла между различными странами радиевые источники, изготовленные по ее заказу, сравненные с парижским и венским международными эталонами и аттестованные, таким образом, в ранге вторичных международных эталонов, и выдавала сертификаты на эти эталоны. Такие вторичные международные эталоны получили: Франция, Германия и Англия в 1912 г, США, Швеция, Япония и Португалия в 1913 г., Дания в 1915 г., Бельгия в 1924 г. (три эталона), Чехословакия в 1924 г. (два эталона), Венгрия в 1925 г., СССР в 1927 г. (два эталона №№ X и XI), Австралия в 1928 г. и Канада в 1932 г.

В Главную Палату Мер и Весов были доставлены из Франции два вторичных международных эталона единицы массы радия №№ X и XI с сертификатами Международного комитета по радиевым эталонам, подписанными Э. Резерфордом, М. Кюри и Ст. Мейером, в которых удостоверялось, что эталоны X и XI сличены с первичным международным эталоном в Париже и с эталоном-копией в Вене.

В связи с получением эталонов X и XI, предназначенных для использования в качестве государственного эталона СССР, при Главной Палате Мер и Весов был образован Комитет по радиевым эталонам в составе Президента Главной Палаты академика Д.П. Коновалова (председатель), академиков В.И. Вернадского и А.Ф. Иоффе. На первом заседании 5 июня 1928 г. Комитет принял решение считать оба эталона – X и XI основным эталоном Советского Союза [4].

В начале 30-х годов возникли опасения за сохранность международных радиевых эталонов 1911 г., и по просьбе Международной комиссии по радиевым эталонам О. Хенигшмид приготовил 20 новых эталонов. Один из эталонов (№ 5430) был выбран в качестве нового первичного международного радиевого эталона, подлежащего хранению в Париже. Эталон № 5428 был передан Институту радия в Вене для замены старого эталона-копии 1911 г. Остальные эталоны были распределены между различными странами для замены прежних национальных эталонов или оставлены в резерве для этой же цели. В 1956 г. Советский Союз получил образец радия № 5427, изготовленный О. Хенигшмидом в 1934 г. Этот образец вместе с 19 другими подобными образцами образует нормализованную систему радиевых эталонов – международный первичный эталон массы радия.

В рамках работ по созданию эталона радия в Главной Палате Мер и Весов была использована установка для сличения радиевых источников на основе “плоского гамма-конденсатора Кюри” и пьезо-кварцевого компенсатора заряда, которая была куплена во Франции и усовершенствована за счет использования метода Таунсенда и ионизационной камеры.

В настоящее время образец радия № 5427 хранится во ВНИИМ и в совокупности со средствами хранения и передачи единицы массы радия образует комплекс средств измерений, входящих в состав ГПЭ единицы массы радия ГЭТ 7-2011. В период 2009-2011 гг. в рамках работ по совершенствованию эталона были введены в его состав современные средства измерений для передачи единицы массы радия и создана система, обеспечивающая сохранность и безопасность эксплуатации образца радия № 5427 [5].

Так была выполнена задача по созданию «специальной лаборатории для проверки качества радиевых препаратов и установления эталона для их оценки», поставленная перед Главной Палатой Мер и Весов еще в 1914 г.

В период 1920–1930 гг. учреждения здравоохранения СССР начинают комплектоваться диагностическими рентгеновскими аппаратами, в связи с чем возникает необходимость метрологического обеспечения дозиметрических измерений в целях определения и учета дозовой нагрузки рентгеновского излучения, как для пациентов, так и для персонала. Научные работы, выполненные советскими учеными П.И. Лукирским, Д.Н. Наследовым, В.М. Дукельским и др., позволили сформулировать определение единицы экспозиционной дозы рентгеновского излучения, и условия ее воспроизведения. Единица экспозиционной дозы – Рентген в этом определении была утверждена как основная единица экспозиционной дозы на II Международном Конгрессе рентгенологов.

В 1925 году во ВНИИМ была организована рентгенометрическая лаборатория, руководителем которой был назначен И.В. Поройков. Под его руководством были выполнены работы в области рентгенометрии, которые завершились созданием в 1931 году национального эталона (четырёхкамерный вариант) единицы экспозиционной дозы – рентгена [6].

В 1940 г. во ВНИИМ был организован отдел измерений ионизирующих излучений в составе радиологической и рентгенометрической лабораторий, руководителем которой был назначен К.К. Аглинцев.

Так завершился первый, довоенный, этап метрологических исследований в области ионизирующих излучений во ВНИИМ:

- от момента открытия радия, исследования его свойств, разработки технологии его выделения из отечественной руды до создания

«специальной лаборатории для проверки качества радиевых препаратов и установления эталона для их оценки»;

- от определения единицы экспозиционной дозы рентгеновского излучения до создания эталона Рентгена, создания рентгенометрической лаборатории и начала дозиметрических исследований во ВНИИМ.

Во время Великой Отечественной войны исследовательские работы в отделе были прекращены, большая часть сотрудников была эвакуирована, а оставшиеся сотрудники во время блокады выполняли задания для фронта.

Послевоенный период 1944-1990 гг.

После окончания войны часть сотрудников вернулась во ВНИИМ, были приняты на работу новые сотрудники, и в 1947 г. был вновь создан отдел измерений ионизирующих излучений в составе радиологической (радиометрической), рентгенометрической (дозиметрической), нейтронной и лаборатории ядерной спектроскопии (1956 г.). В этот послевоенный период в отделе работали выдающиеся ученые: П.И. Лукирский, К.К.Аглинцев, А.С. Карамян, Б.С. Джелепов, А.А. Константинов, Ф.М. Караваев, М.Ф. Юдин и др.

Сразу после окончания войны перед отделом были поставлены следующие основные задачи по обеспечению единства измерений радиоактивности и ионизирующих излучений:

- в полевых условиях с помощью многочисленного парка радиометров при определении загрязненности поверхностей и территорий альфа и бета-нуклидами после проведения испытаний оружия, в санитарной зоне предприятий, при захоронении радиоактивных отходов и т.д.;
- в технологических процессах, связанных с производством радионуклидной продукции, в первую очередь – радионуклидных источников;
- в здравоохранении и охране труда с целью обеспечения учета доз при диагностических процедурах и производственных операциях.

В соответствии с этим в отделе были развернуты следующие основные направления работ [7]

- разработка и создание точных методов и средств измерений физических величин, которые используются в военной и атомной технике, ядерно-топливном цикле и радиационной защите;
- создание эталонов единиц наиболее востребованных радиометрических, дозиметрических и нейтронных физических величин;
- разработка и создание системы метрологического обеспечения измерений ионизирующих излучений.

В период 1964–1969 гг. во ВНИИМ были проведены следующие исследования по разработке методов и созданию высокоточной аппаратуры для измерений:

- в области активности альфа, -бета,-гамма излучающих радионуклидов с целью воспроизведения единицы активности — Кюри, нового эталона единицы массы радия (К.К. Аглинцев, П.И. Лукирский, М.Ф. Юдин, Ф.М. Караваев, А.А. Константинов, Е.А. Хольнова) [8];
- в области дозиметрии рентгеновского, гамма- и бета-излучений (К.К. Аглинцев, М.Ф. Юдин, З.П. Балон, Г.П. Остромухова, И.А. Уряев, М.П. Кочина, Р.Ф. Кононова, В.Н. Тучин) [9];
- в области точных нейтронных измерений (А.С. Карамян, И.А. Ярицына, М.Ф. Юдин, В.Т. Щеболев, В.И. Фоминых, А.П. Яновский, Г.М. Стуков) [10];
- в области исследования ядерно-физических констант (Б.С. Джелепов, С.А. Шестопалова, О.И. Сумбаев, П.Т. Прокофьев, И.Ф. Учеваткин, В.Э. Тер-Несесянц) [11].

В результате этих исследований были разработаны научные основы воспроизведения важнейших единиц в области измерений ИИ, созданы эталоны и разработаны методы и средства передачи единиц физических величин от эталонов к рабочим приборам и источникам ИИ.

В 1969 г. Госстандарт СССР утвердил систему эталонов единиц [12,13,14] в области измерений ИИ, созданных в отделе ионизирующих излучений ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, в качестве государственных первичных эталонов СССР:

- активности радионуклидов – ГЭТ 6-69, ГОСТ 8.033-74 (К.К. Аглинцев, М.Ф. Юдин, Ф.М. Караваев, А.А. Константинов, Е.А. Хольнова, С.А. Русинова, А.Е. Кочин, В.Я. Алексеев);
- массы радия – ГЭТ 7-69, ГОСТ 8.036-74 (Ф.М. Караваев, Е.А. Хольнова, А.Ф. Дричко, Л.П. Кулькова);
- поглощенной и эквивалентной дозы нейтронного излучения – ГОСТ 8.035-74 (М.Ф. Юдин, А.П. Яновский, СИ. Слепышков, Л.П. Попружко, С.Н. Балахничев, В.И. Фоминых).
- экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучения – ГЭТ 8-69 и ГОСТ 8.034-74 (И.В. Поройков, К.К. Аглинцев, М.Ф. Юдин, Г.П. Остромухова, З.П. Балон, М.П. Авотина, И.А. Уряев, М.П. Кочина, В.Н. Тучин);
- поглощенной дозы бета-излучения – ГЭТ 9-69, ГОСТ 8.035-74 (К.К. Аглинцев, И.А. Уряев, М.П. Кочина);
- потока нейтронов – ГЭТ 10-69, ГОСТ 8.031-74 (А.С. Карамян, И.А. Ярицына, В.Т. Щеболев, В.И. Фоминых, Г.М. Стуков, Б.И. Кузаев, Ю.С. Силин);

- плотности потока тепловых нейтронов – ГЭТ 11-69, ГОСТ 8.32-75 (И.А. Ярицына, О.Л. Андреев, А.Е. Кочин, Е.П. Кучерявенко, Г.М. Стуков).

В период 1969–1975 гг. были выполнены работы по совершенствованию и оптимизации системы метрологического обеспечения атомной науки и техники, ядерной энергетики, разработки и внедрения новейших радиационных технологий, широкому применению источников ИИ и ускорителей заряженных частиц в медицине для диагностики и лечения заболеваний, разведки полезных ископаемых, ядерной геофизике. Во ВНИИМ вводятся в эксплуатацию новые источники излучений: бетатрон Б50/50 с максимальной энергией 50 МэВ (К.К. Хлебников, М.Ф. Юдин, В.В. Скотников, Н.Д. Виллевалде, И.А. Уряев, Ю.В. Лысанов, Г.В. Абрамов) и источники импульсного рентгеновского излучения.

В результате этих исследований во ВНИИМ были созданы новые эталоны, которые были утверждены в 1975 г. Госстандартом СССР в качестве Государственных эталонов единиц:

- потока энергии тормозного излучения с максимальной энергией 50 МэВ – ГЭТ 72-75, ГОСТ 8.201-76 (М.Ф. Юдин, В.В. Скотников, И.И. Цветков, В.И. Фоминых, В.Н. Бруй, А.Н. Таянович, А.А. Демидов);
- мощности поглощенной дозы рентгеновского излучения (20-60 кэВ) – ГЭТ 73-75, ГОСТ 8.203-76 (М.Ф. Юдин, В.И. Фоминых, А.П. Себекин, Р.Ф. Кононова, Н.И. Космина);
- потока электронов и потока энергии электронов с энергией 5-50 МэВ – ГЭТ 93-75, ГОСТ 8.202-76 (М.Ф. Юдин, В.И. Фоминых, И.И. Цветков, А.А. Демидов, Г.В. Кисельникова);

В период 1975–1985 гг. возникла потребность в актуализации системы МО ИИ, обусловленная практическими задачами внедрения системы ГСИ, которая была решена путем создания эталонных комплексов, воспроизводящих несколько взаимосвязанных физических величин, созданием сети вторичных эталонов в различных регионах страны, совершенствованием и оптимизацией методов и средств передачи единиц разрядным эталонам (образцовым) и рабочим средствам измерений.

В результате завершения этих работ во ВНИИМ в период с 1979 по 1982 гг. модернизированы и утверждены в новом составе:

- эталонный комплекс единиц экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучения – ГЭТ 8-82, ГОСТ 8.034-82 (Г.П. Остромухова, М.П. Кочина, В.И. Фоминых, Р.Ф. Кононова, Е.Н. Юрятин, А.П.

Себекин, Ю.В. Лысанов, Т.Н. Новоселова, С.А. Федина, Г.И. Маньков):

- эталон единицы поглощенной дозы бета-излучения – ГЭТ 9-82, ГОСТ 8.035-82 (И.А. Уряев, Е.Н. Румянцева, А.М. Выгодский, Ю.В. Лысанов, В.И. Фоминых);
- эталонный комплекс единиц потока и плотности потока нейтронов – ГЭТ 10-81, ГОСТ 8.031-82 (В.Т. Щеболева, З.А. Рамендик, Г.М. Стуков, И.А. Харитонов, Е.П. Кучерявенко, Ш.В. Яблоков, В.А. Тумольский);
- эталонный комплекс единиц активности радионуклидов, удельной объемной и поверхностной активности радионуклидов, потока и плотности потока альфа- и бета-частиц и фотонов, – ГЭТ 6-84, ГОСТ 8.033-84 (М.Ф.Юдин, Ф.М. Караваяев, А.А. Константинов, Е.А. Хольнова, А.Е. Кочин, В.Я. Алексеев, А.Ф. Дричко);
- эталон экспозиционной дозы, средней мощности экспозиционной дозы, среднего потока и средней плотности потока энергии импульсного рентгеновского излучения – ГЭТ 134-82, ГОСТ 8.473-82 (М.Ф. Юдин, Н.Д. Виллевалде, И.А. Уряев, А.В. Оборин, Ю.А. Волков, В.И. Фоминых).

В рамках работ по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, случившейся в 1986 г., были разработаны методы и аппаратура, обеспечивающие массовый радиационный контроль объектов окружающей среды, продукции сельского хозяйства, животноводства, сырья, пищевых продуктов, загрязненных радионуклидами. Эти исследования привели к совершенствованию действующего эталона единицы активности радионуклидов ГЭТ 6-84 и созданию в его составе новых эталонных установок. В 1995 г. Госстандартом РФ был утвержден [15] в новом составе Государственный первичный эталон единиц активности, потока и плотности потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников ГЭТ 6-95 (ГОСТ 8.033-96), представленный коллективом авторов ВНИИМ в составе: Ю.В. Тарбеев, М.Ф. Юдин, Н.И. Кармалицын, И.А. Харитонов, Т.Е. Сазонова, А.Е. Кочин, Е.А. Хольнова. За эту работу авторский коллектив ВНИИМ был удостоен премии Правительства РФ за 1996 г.

Всего в 1990 г. в СССР в области ионизирующих излучений эксплуатировалось 14 первичных эталонов: 8 – во ВНИИМ и 6 во ВНИИФТРИ.

Таким образом, второй этап развития отдела измерений ионизирующих излучений ВНИИМ завершился созданием системы национальных эталонов единиц основных физических величин в области радиометрии, дозиметрии и нейтронных измерений и системы метрологического обеспечения измерений в стране, опирающейся на

средства измерений: первичные, вторичные, разрядные эталоны, приборы и меры и научно-техническую документацию: поверочные схемы, методики поверки, протоколы измерений и свидетельства о поверке.

Современный период 1990–2017 гг.

Современный этап истории отдела, который включает период с 1990 г. по настоящее время, в свою очередь, целесообразно рассматривать как два отдельных периода, один из которых пришелся на время преобразований в стране, происходивших в 1990–2000 гг.

В связи с изменениями, произошедшими в это время в стране, объем государственного финансирования промышленности резко сократился, что заставило предприятия отказаться от непрофильных расходов, в частности, от работ, относящихся к метрологии.

Поскольку финансирование ВНИИМ целиком зависело от бюджетных поступлений, направляемых во ВНИИМ непосредственно Госстандартом на поддержку эталонов и их совершенствование или опосредованно через предприятия - заказчиков метрологических услуг, объем финансовых поступлений ВНИИМ резко сократился. В связи с этим, в 1993 г. отдел был преобразован вынужденно сначала в две лаборатории: государственных эталонов в области измерений активности (рук. лаб. И.А. Харитонов) и дозиметрии ионизирующих излучений (рук. лаб. В.И. Фоминых), а затем в 1995 г. – в одну лабораторию государственных эталонов в области измерений ионизирующих излучений (рук. лаб. И.А. Харитонов) с общей численностью сотрудников 23 человека.

Период 1990–2000 гг. можно охарактеризовать как период выживания, как для предприятий - заказчиков метрологических услуг, так и для отдела ионизирующих излучений ВНИИМ. В этот период на рынке приборостроения и метрологических услуг произошли следующие важные изменения

- появились иностранные производители измерительной техники, которые в течение 10 лет фактически вытеснили отечественного производителя с рынка консолидированных интеллектуальных приборов;
- акционировались бывшие государственные приборостроительные заводы;
- появились российские частные предприятия в сфере приборостроения и метрологических услуг;
- увеличился объем испытаний с целью утверждения типа средств измерений, сертификации продукции и аттестации программного обеспечения метрологического назначения за счет интеграции российского рынка товаров и услуг в международный рынок;
- возникла сеть испытательных лабораторий радиационного контроля, которая нуждалась в аккредитации для выполнения

работ по аттестации продукции и услуг по радиационному признаку.

С учетом этих изменений рынок метрологических услуг стал развиваться в новом формате [16], что привело к необходимости внесения соответствующих изменений, как в структуру тематических направлений, так и в организационную структуру отдела. В 2006 г. лаборатория государственных эталонов в области измерений ионизирующих излучений была вновь преобразована в отдел (рук. отдела И.А. Харитонов – с 2006, Н.Н. Моисеев – с 2009 г., С.Г. Трофимчук – с 2011 г.). В отделе были организованы два новых сектора: сектор испытаний СИ с целью утверждения типа (рук. сектора Н.Д. Виллевалде) и сектор аккредитации лабораторий радиационного контроля (рук. сектора С.Г. Трофимчук).

Исследовательские работы по традиционным направлениям: дозиметрия бета, гамма и рентгеновского излучения, измерение активности радионуклидов и нейтронные измерения из-за недостаточного финансирования в период 1990–2000 гг. практически не велись, а оборудование из состава первичных эталонов в основном использовалось для поверки рабочих эталонов и средств измерений.

Начиная с 2000 г., Росстандарт частично восстановил объем финансирования работ по содержанию и развитию первичных эталонов, что позволило начать работы по модернизации и совершенствованию эталонов, планировать работы по их развитию и вернуться к традиционной структуре отдела. Структура отдела, которая утверждена в 2016 г., включает 4 лаборатории (кроме указанных выше тематических лабораторий, в составе отдела в настоящее время имеется лаборатория прикладных исследований), и соответствует уровню востребованности измерений ионизирующих излучений со стороны экономики и общества в России.

На современном этапе развития метрологии приоритеты в востребованности точных измерений в обществе существенно изменились, и главными направлениями, определяющими развитие измерений ионизирующих излучений, стали здравоохранение и радиоэкология. Важным направлением стало также уточнение метрологических характеристик эталонов по результатам ключевых сличений с целью обеспечения соответствия их метрологических характеристик условиям, предъявляемым к национальным эталонам, участвующим в ключевых сличениях.

В обеспечение развития новых направлений во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в период 2000–2016 гг. были выполнены работы по модернизации и совершенствованию действующих эталонов [17], в результате которых были утверждены в новом составе оборудования государственные первичные эталоны единиц

- потока электронов, плотности потока электронов и флюенса (переноса) электронов, потока энергии, плотности потока энергии и флюенса (переноса) энергии электронного и тормозного излучения – ГЭТ 93-2001, ГОСТ 8.576-01 (А.В. Оборин, И.И. Цветков,) [18];
- кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучения – ГЭТ 8-2011, ГОСТ 8.034-11 (А.В. Оборин, А.Ю. Виллевальде, Н.Д. Виллевальде) [19];
- массы радия – ГЭТ 7-2011, ГОСТ 8.036-11 (Н.Н. Моисеев, Е.Е. Терещенко) [5];
- активности, потока и плотности потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников – ГЭТ 6-2016 (С.Г. Трофимчук, И.В. Алексеев, И.А. Харитонов, Н.Н. Моисеев, Г.В. Жуков, Т.И. Шильникова, А.В. Заневский, Е.Е. Терещенко, Д.М. Эфрос) [20].

Одним из основных направлений деятельности отдела, наряду с созданием и совершенствованием первичных эталонов, является метрологическое обеспечение измерений ионизирующих излучений в стране, потребность в котором зависит от изменений, происходящих в экономике страны [21].

Основным направлением метрологического обеспечения измерений в стране до 1986 г. было обеспечение правильности измерений метрологических характеристик радиометров, выпускаемых предприятиями в качестве продукции, и серийных унифицированных источников излучения, применяемых для поверки и калибровки радиометров активности, потока и плотности потока частиц и нейтронов и дозиметров ионизирующего излучения [22].

После катастрофы на Чернобыльской АЭС в 1986 г. на первое место выдвинулась задача метрологического обеспечения измерений, выполняемых при радиоэкологическом мониторинге окружающей среды. Возросла роль специальных эталонных источников для имитации реальных объектов измерений – образцов почв, пищевых продуктов, фантомов человека, загрязненных радионуклидами, создаваемых на основе эталонных (образцовых) растворов радионуклидов.

В период 2000–2017 гг. наиболее важными направлениями с точки зрения востребованности измерений стали радионуклидная диагностика, лучевая терапия и охрана окружающей среды, метрологическое обеспечение которых является в настоящее время актуальной проблемой. Развитие ядерной медицины в России, методы которой сегодня все шире применяются при диагностике самых различных заболеваний: кардиологических, неврологических, эндокринологических,

онкологических и др. предусматривает создание в стране высокотехнологичных центров медицинской радиологии с целью организации массовых скрининговых осмотров населения [23,24].

Отдел осуществляет метрологическое обеспечение измерений ионизирующих излучений в рамках двух направлений

- путем практической реализации поверочных схем [25];

- путем непосредственного взаимодействия с отраслевыми лабораториями и предприятиями по актуальным метрологическим направлениям развития производства и технологий.

В качестве примеров взаимодействия по значимым направлениям можно привести следующие работы:

- метрологическое сопровождение производства и первичной поверки источников из кобальта-60 в ПО МАЯК (Челябинск) для экспортных поставок радионуклидной продукции в Великобританию, технологии производства оружейного плутония во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, источников медицинского назначения, в том числе протяженных источников из кобальта-60 и калифорния-252, иридия-192 и др. совместно с ГНЦ НИИАР (Димитровград), кюрия-244, америция-243, полония-210 в растворах совместно с РИ им. В.Г. Хлопина и РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) – для обеспечения поставок радионуклидной продукции в Японию и Швейцарию;

- разработка и аттестация рабочих эталонов в виде источников специального назначения-имитаторов технологических сред и проб окружающей среды, совместно с РИ им. В.Г. Хлопина и НТЦ РИМЭКС, – для комбинатов Минатома; в виде фантомов человека совместно с НТЦ РАДЭК – для предприятий РОСАТОМЭНЕРГО, имитаторов проб окружающей среды ОМАСН – для СЭС (Санкт-Петербург);

- проведение испытаний СИ и разработка методик поверки измерительных каналов, разработанных НИТИ им. А.А. Александрова – для экспортных поставок систем АСРК в составе АЭС (Китай);

- создание системы метрологического обеспечения измерений активности радионуклидов в фармпрепаратах путем передачи единицы от растворов, использовавшихся в ключевых сличениях, к дозкалибраторам, применяемым в лабораториях медицинских учреждений, и практическая реализация этой системы в лечебных учреждениях Санкт-Петербурга.

Система метрологического обеспечения средств измерений ионизирующих излучений, опирающаяся на эталоны, поддерживаемые в отделе измерений ионизирующих излучений во ВНИИМ, служит основой для развития радиационных технологий, производства радионуклидной продукции, фармпрепаратов, при контроле радиационной безопасности, радиоэкологическом мониторинге, в радиационной диагностике и лучевой терапии в медицине [26-30].

Наряду с обеспечением единства измерений внутри страны важнейшей задачей является поддержание соответствия единиц физических величин на международном уровне. Это достигается неукоснительным соблюдением положений Метрической Конвенции, выполнением решений международных законодательных органов в области метрологии, но главным образом путем участия в международных сличениях эталонов национальных лабораторий.

В соответствии с Договоренностью об эквивалентности национальных эталонов [31], подписанной национальными метрологическими институтами в 1999 г., Консультативные комитеты Международного Комитета Мер и Весов (МКМВ) планируют и проводят ключевые сличения национальных эталонов для установления наилучшего значения единиц СИ на данный момент времени, значений степеней эквивалентности по отношению к наилучшему значению единицы и степеней взаимной эквивалентности. Заключение Договоренности придало международным ключевым сличениям дополнительную важность как инструменту определения международного уровня национальных эталонов [32,33].

Консультативный Комитет МКМВ по эталонам в области измерений ионизирующих излучений (ККИИ), одним из инициаторов создания которого был ВНИИМ, функционирует с 1956 г. В 1969 г. в составе ККИИ были образованы три секции измерений: рентгеновского, гамма и электронного излучений (дозиметрии), активности радионуклидов (радиоактивности) и нейтронного излучения. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, наряду с другими ведущими национальными лабораториями, является постоянным членом секций. На регулярных заседаниях секций рассматриваются, в частности, вопросы планирования, организации и проведения ключевых сличений эталонов единиц в области радиоактивности, дозиметрии и нейтронных измерений, типы которых были выбраны и согласованы на заседаниях секций и утверждены ККИИ.

В области радиоактивности проводятся два типа сличений национальных эталонов единицы активности: многосторонние и в системе SIR. Многосторонние сличения предназначены для определения наилучшего значения единицы Беккереля для данного радионуклида и поэтому в сличениях этого типа, как правило, участвует не менее 20 национальных лабораторий. Сличения в системе SIR проводятся для удовлетворения потребности отдельных лабораторий в подтверждении метрологических характеристик национального эталона по конкретному гамма-излучающему радионуклиду.

Радиометрическая лаборатория ВНИИМ с 1961 г. участвовала более чем в 20 многосторонних сличениях эталонов активности радионуклидов [15,34], в том числе ^{32}P (1961 г.), ^{57}Co (1962, 1963, 1972 гг.), ^{204}Tl (1962 г.),

^{60}Co (1964 г.), ^{54}Mn (1972 г.), ^{139}Ce (1976 г.), ^{134}Cs (1978 г.), ^{55}Fe (1978 г.), ^{125}I (1988 г.), ^{133}Ba (1984 г.), ^{139}Ce (1986 г.), ^{75}Se (1992 г.), ^{204}Tl (1997 г.), ^{152}Eu (1999 г.), ^{89}Sr (2000 г.), ^{238}Pu (2001 г.), ^{204}Tl (2002-2003 гг.), ^{65}Zn (2002 г.), ^{54}Mn (2003 г.), ^{51}Cr (2004 г.), ^{139}Ce (2004 г.), ^{125}I (2004 г.), ^{134}Cs (2005 г.), ^{241}Am (2003, 2006 гг.), ^{137}Cs (2007 г.), ^{152}Eu (2008 г.), ^{99}Tc (2012 г.), $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (2014 г.), ^{18}F (2014 г.).

Нейтронная лаборатория ВНИИМ, начиная с 1960 г., участвовала в 12 сличениях [35,36], в том числе, потока канадского $\text{Ra}(\alpha,\text{p})\text{Be}$ источника (1961 г.), плотности потока тепловых нейтронов (1967 г.), плотности потока быстрых моноэнергетических нейтронов с энергией 14,7 МэВ (1982 г.), плотности потока промежуточных нейтронов с энергией 24,5 кэВ (1996 г.), потока нейтронов радионуклидного источника $\text{Am-Be}(\alpha,\text{n})$ (1999–2003 гг.), плотности потока моноэнергетических нейтронов с энергиями 0.144, 1.2, 5.0 и 14.8 МэВ (2001–2006 гг.), плотности потока моноэнергетических нейтронов с энергиями 0.0274, 0.565, 2.5 и 17 МэВ (2011–2012 гг.), калибровке нейтронных дозиметров в полях радионуклидных источников, рекомендованных стандартом ISO-8529 (2011–2012 гг.),

Дозиметрическая лаборатория ВНИИМ также регулярно участвует [37,38] в ключевых сличениях ККИИ: в 1998–1999 гг. (и в 2009–2011 гг. повторно) лаборатория выполнила ключевые сличения кермы в воздухе на гамма-излучении ^{137}Cs (VIPM.R(I)-K3) и ^{60}Co (VIPM.R(I)-K1), а также на рентгеновском излучении при напряжениях на трубке 5-50 кВ (VIPM.R(I)-K2) и 100-250 кВ (VIPM.R(I)-K3).

Наряду с ключевыми сличениями по линии ККИИ проводятся региональные сличения в рамках КООМЕТ, ЕВРАМЕТ и др., а также двусторонние сличения эталонов. В 2005 г. были проведены региональные сличения эталонов единицы активности АРМР с радионуклидом ^{134}Cs , в 2010 г. – региональные сличения кермы в воздухе ЕВРАМЕТ, в которых со стороны КООМЕТ участвовал ВНИИМ им. Д.И.Менделеева. В 1998 г. были проведены двусторонние сличения ВНИИМ с LNHВ (Франция) с радионуклидом ^{226}Ra [39-41], с РТВ (Германия) и LNHВ (Франция) по согласованию единицы поглощенной дозы бета-излучения [42,43].

Высокий уровень эталонов РФ в области ионизирующих излучений, поддерживаемых во ВНИИМ, подтвержденный по результатам более чем 60 международных сличений национальных эталонов, является фундаментом для обеспечения достоверных измерений в стране и признания протоколов измерений, выполненных в России, на международном уровне.

Заключение

В настоящей работе рассмотрен главным образом метрологический аспект исследований в области радиоактивности с учетом вклада ученых, работавших в Главной Палате Мер и Весов и во ВНИИМ им. Д.И.Менделеева на протяжении более 100 лет. Даже в этом кратком изложении в истории отдела обнаруживается блестящий круг имен замечательных людей, на протяжении нескольких десятилетий создававших общими усилиями метрологию радиоактивности и ионизирующих излучений в целом, как науку, которая успешно продолжает развиваться и в настоящее время новыми поколениями ученых-метрологов.

Литература

1. Караваев Ф.М. Измерение активности нуклидов. М: Изд-во стандартов. 1972 .- 228 с.: табл. ил.
2. Харитонов И.А. От открытия радиоактивности до эталона радия// Атомная стратегия. 2003. №2.С. 31-33.
3. Якобсон И.И. В. А. БОРОДОВСКИЙ и Л. С. КОЛОВРАТ-ЧЕРВИНСКИЙ (из истории ранних радиоактивных исследований в России)// Успехи физических наук.1952. май Т.XLVII. вып.1. С. 115-119.
4. Богоявленский Л.Н. Установление основного эталона радия СССР. В сб: Исследование в области радиологии. Труды ВНИИМ. 1939. вып.26(42). С. 3.
5. Моисеев Н.Н. Государственный первичный специальный эталон единицы массы радия//Измерительная техника.№9.М.2013.С.5-7.
6. Поройков И.В. Рентгенометрия.М.-Л..1950. Изд-во технико - теоретической литературы. 1950. 384с.: ил.
7. Аглинцев К.К. Измерения ионизирующих излучений. Научно исследовательские работы в области метрологии // Ред. Е.Т. Чернышев. - М.; Л.: Изд-во стандартов, 1965. 280 с.: ил.
8. Караваев Ф.М. Измерения активности радионуклидов. Научно исследовательские работы в области метрологии / Ред. Е.Т. Чернышев. - М.; Л.: Изд-во стандартов, 1965.280 с.: ил.
9. Юдин М.Ф. Дозиметрия ионизирующих излучений. Научно исследовательские работы в области метрологии / Ред. Е.Т. Чернышев. - М.; Л.: Изд-во стандартов, 1965. 280 с.: ил.
- 10.Ярицина И.А., Нейтронные измерения. Научно исследовательские работы в области метрологии / Ред. Е.Т. Чернышев. - М.; Л.: Изд-во стандартов, 1965 г. 280 с.: ил.

11. Шестопалова С.А. Ядерная спектроскопия. Научно исследовательские работы в области метрологии / Ред. Е.Т. Чернышев. - М.; Л.: Изд-во стандартов, 1965 г. 280 с.: ил.
12. Юдин М.Ф., Кармалицын Н.И., Кочин А.Е., Сазонова Т.Е, и др. Комплексный первичный эталон единиц активности радионуклидов, потока и плотности потока ионизирующих частиц радионуклидных источников // Измерительная техника. 1993. № 6. С. 60-62.
13. Андреев О.Л., Ярицына И.А.. Эталон единицы плотности потока тепловых нейтронов// Атомная энергия. 1969. т.26. вып. 3. С.304.
14. Ярицына И.А., Щеболев В.Т., Фоминых В.И., Стуков Г.М. Государственный первичный эталон единицы потока нейтронов// Измерительная техника. 1972, №8. С. 8-11.
15. Кочин А.Е, Харитонов И.А Государственный первичный эталон единиц активности радионуклидов, потока и плотности потока альфа, -бета-частиц и фотонов радионуклидных источников// Метрологическая энциклопедия. изд.2. том 1. СПб. Изд-во Лики России. 2015. С 703-708.
16. Харитонов И.А. Метрология и приборостроение в условиях рыночной интеграции// Атомная стратегия XXI. декабрь 2002. С. 16-17.
17. Трофимчук С.Г., Оборин А.В., Моисеев Н.Н., Харитонов И.А. Комплекс государственных первичных эталонов ВНИИМ им. Д.И.Менделеева в области измерений ионизирующих излучений. //В кн.: Материалы международной научно-технической конференции МЕТРОЛОГИЯ-2014". Минск. БелГИМ. 2014. С. 201.
18. Харитонов И.А., Цветков И.И. "Государственный первичный эталон единиц потока электронов, плотности потока электронов и переноса электронов, потока энергии, плотности потока энергии и переноса энергии электронного и тормозного излучений"// Измерительная техника, №9, М.. 2002.
19. Оборин А.В., Виллевальде А.Ю., Трофимчук С.Г. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений //Измерительная техника. 2012. № 8. С. 3-8.
20. Трофимчук С.Г., Оборин А.В., Моисеев Н.Н., Харитонов И.А. Комплекс государственных первичных эталонов ВНИИМ им. Д.И.Менделеева в области измерений ионизирующих излучений. Международная научно-техническая конференция "МЕТРОЛОГИЯ-2014". Минск. БелГИМ. 2014. Стр. 201.

21. И.А. Харитонов, И.И. Цветков “Государственный первичный эталон единиц потока электронов, плотности потока электронов и переноса электронов, потока энергии, плотности потока энергии и переноса энергии электронного и тормозного излучений”, ИТ, №9, М., 2002 г.
22. Kharitonov I.A., Oborin A.V., Villevalde A.Y. Changes to the VNIIM air kerma primary standard // Metrologia.2007.Vol.44.P.L71-72.
23. Алексеев И.В., Харитонов И.А., Сэпман С.В. Модернизация государственного первичного эталона активности ГЭТ 6-95. В кн.: Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии: тез. докл. XIII междунар. совещ. Санкт-Петербург.2015.С.18-19.
24. В.И. Фоминых, И.А. Харитонов, М.Ф. Юдин Метрологическое обеспечение измерений тонизирующих излучений// Метрологическая энциклопедия, 2 изд. Т. 1.СПб.Изд-во:Лики России.2015. С 669-674.
25. И.А. Харитонов Обеспечение достоверности измерений ионизирующих излучений с использованием реально находящихся в обращении средств измерений. В кн.: Международная конференция “Радиационная безопасность: обращение с РАО и ОЯТ”, Санкт-Петербург, 24-27 сентября 2002 г.: доклады 5 международной конференции .С.47-48.
26. Сэпман С.В, Алексеев И.В., Заневский А.В., Терещенко Е.Е., Харитонов И.А. Метрологическое обеспечение измерений активности радионуклидов в радиофармпрепаратах // В кн.: Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии: тез. докл. XIII междунар. совещ. Санкт-Петербург.2015.С.82-84.
27. Сэпман С.В., Харитонов И.А., Заневский А.В., Коростин С.В., Божко Н.С. Метрологическое обеспечение измерений активности РФП// В кн.: РАДИОФАРМА. Москва. 17-19 июня 2015.: тез. докл. XIII междунар. научно-практ. конф.С.65.
28. Харитонов И.А. Реализация ФЗ №102” Об обеспечении единства измерений” в период 2008-2015 гг.// В кн.: Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии: тез. докл. XIII междунар. совещ. Санкт-Петербург.2015.С.124.
29. Гришин Д.С., Кучин Н.Л., Кызьюров В.С., Лайкин А.И., Михеев Ю.В., Триумфов Н.Г., Чистяков О.Б., Харитонов И.А. [Погружные гамма-спектрометры – опыт применения и перспективы использования](#) //АНРИ. №2 (85). 2016. С.10–21.
30. Стамат И.П., Терентьев М.В., Харитонов И.А. и др. Международный калибровочный инструмент «ICSE»: некоторые итоги и перспективы обеспечения единства измерений ОА радона

- // В кн.: Практика защиты населения от облучения радоном: матер. науч.-практ. конф. СПб. 1996. С. 18-19.
31. Кочин А.Е., Соколова И.А., Шильникова Т.И., Харитонов И.А., Фоминых В.И.. Метрологическое обеспечение измерений удельной активности трития в воде для целей радиационного контроля окружающей среды// В кн.: "Безопасность ядерных технологий: транспортирование радиоактивных материалов (АТОМТРАНС 2006)": матер. междунар. ядерного форума. СПб, 2006. С.71.
32. Андерсон Е.Б., Гаврилов В.М., Кузнецов Ю.В., Пантелеев Ю.А., Степанов А.В., Тишков В.П., Трофимчук С.Г., Харитонов И.А. Вопросы обеспечения качества в программах радиационного контроля и мониторинга в районах действующих предприятий ЯТЦ, при снятии объектов с эксплуатации и при обращении с РАО// В кн.: Радиационная безопасность: Радиоактивные отходы и экология: матер. II междунар. конфер. СПб, 1999.
33. Виллевалде Н.Д., Оборин А.В., Харитонов И.А. Некоторые аспекты применения государственного первичного эталона экспозиционной дозы (кермы в воздухе) рентгеновского и гамма-излучений в медицинской радиационной дозиметрии// В кн.: Материалы IV международного симпозиума «Актуальные проблемы дозиметрии» 23–24 октября 2003 года. Минск. Изд-во: Триолета. Под общей редакцией к.т.н., доцента В. Чудакова.
34. Харитонов И.А. Соглашение об эквивалентности национальных эталонов – основа метрологического обеспечения международной кооперации в решении радиоэкологических задач// В кн.: Радиационная безопасность: Радиоактивные отходы и экология: матер. II междунар. конфер. СПб, 1999.
35. I.A. Kharitonov Some examples of the MRA application in trading of radionuclide products and radioecological monitoring// Appl.Radiat.Isot. 60. 2004. pp.139-143.
36. Харитонов И.А., Чуновкина А.Г. Международные сличения как инструмент подтверждения измерительных и калибровочных возможностей НМИ и обеспечения единства измерений в международном масштабе// Измерительная техника. 2007. Т.50. №7. С.711-714.
37. I.A. Kharitonov et al Measurement of the activity concentration of the radionuclide Am-241 in a solution// Metrologia 44. Technical Supplement. 2007. 06001.
38. Моисеев Н.Н. Государственный первичный эталон единиц потока и плотности потока нейтронов.// Российская метрологическая

- энциклопедия. 2 изд. Т. 1. СПб. Изд-во: Лики России. 2015. С 689-693.
39. J.Chen, Z. Wang, C. Rong, G. Lövestam, A. Plompen, N. Puglisi, D.M. Gilliam, C.M. Eisenhauer, J.S. Nico, M.S. Dewey, K. Kudo, A. Uritani, H. Harano, N. Takeda, D.J. Thomas, N.J. Roberts, A. Bennett, P. Kolkowski, N.N. Moiseev, I.A. Kharitonov, S. Guldbakke, H. Klein, R. Nolte, D. Schlegel, CIAE, IRMM, NIST, NMIJ, NPL, VNIIM, PTB] International key comparison of neutron fluence measurements in monoenergetic neutron fields: CCRI(III)-K10// *Metrologia*. 44. Tech. Suppl. 2007. 06005.
 40. Оборин А.В. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока рентгеновского и гамма излучения// *Российская метрологическая энциклопедия. 2 изд. Т. 1. СПб. Изд-во: Лики России. 2015. С. 676-683.*
 41. C. Kessler, P. J. Allisy-Roberts, A. V. Oborin, A. Y. Villevalde Comparison of the standards for air kerma of the VNIIM and the BIPM for ^{60}Co gamma radiation // *Metrologia*. 2011. V. 48, Tech. Suppl., 06001.
 42. Morel J., Sepman S., Rasko M., Terechtchenko E., Delgado J.U. Precise determination of photon emission probabilities for the main X- and g-rays of ^{226}Ra in equilibrium with its daughters// *Appl. Rad. Isot.* Vol.60. Issue 2-4. 2004. pp. 341-347.
 43. N.I. Karmalitsyn, S.V. Sepman, I.A. Kharitonov. Standardization of ^{226}Ra radionuclide solution// *NIM A* 369 .1996. pp. 411-413.
 44. I.A. Kharitonov, M.A. Rasko, S.V. Sepman, E.E. Terechtchenko, A.M. Hejdelman. A source for measurement of the absolute intensities of ^{226}Ra gamma-radiation in equilibrium with decay products// *Applied Radiation and Isotopes*. 56. 2002. pp. 37-40.
 45. Helmstädter K., Böhm J., Ambrosi P., Fominych V., Rumyantseva E., Fedina S. Comparison of extrapolation chamber measurements of the absorbed dose rate for beta radiation between VNIIM (Russia) and PTB (Germany)// *Metrologia*. 2004. 41. Tech. Suppl. 06008.
 46. Lecante C., Uryaev I., Villevalde N., Rumyantseva E., Chauvenet B. Comparison of extrapolation chamber measurements of the absorbed dose rate in beta radiation// *Metrologia*. 2004. 41. Tech. Suppl. 06009.

МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ АКТИВНОГО СЛОЯ ИСТОЧНИКОВ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТОРА

Стяжкин В.А., Васильев И.О.

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

Передача единицы активности радионуклидов (АРН) осуществляется методом сравнения рабочих эталонов (РЭ) с однотипными эталонными мерами при помощи компараторов [1, 2] по методикам поверки согласно ГОСТ 8.581-2003, ГОСТ 8.582-2003 [3, 4].

При поверке РЭ АРН по 1 разряду значения относительной погрешности результатов измерений АРН δ_n не должны превышать 4 %. δ_n вычисляется по формуле:

$$\delta_n = 2S_\Sigma \quad (1)$$

Значение погрешности поверки РЭ АРН, выражаемое в виде относительного среднего квадратического отклонения (СКО), рассчитывается по формуле:

$$S_\Sigma = \sqrt{S_R^2 + S_o^2 + \frac{1}{3}\theta_v^2 + \frac{1}{3}\theta_k^2 + \frac{1}{3}\theta_r^2}, \quad (2)$$

где S_R – СКО результатов измерений отношений скоростей счёта импульсов от эталонного и поверяемого источников с поправками на фон и разрешающее (мёртвое) время;

S_o – выраженная в виде СКО суммарная погрешность эталонного источника;

θ_v – неисключённая систематическая погрешность (НСП), обусловленная нестабильностью компаратора во времени;

θ_k – НСП, обусловленная неравномерностью активного слоя источников и детектора компаратора;

θ_r – НСП, обусловленная неточностью определения разрешающего (мёртвого) времени компаратора.

Экспериментальным путём были получены все составляющие S_Σ , максимальные значения которых и результаты расчётов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип компаратора	Измеряемый параметр, %						
	S_R	S_o	θ_ν	θ_K	θ_τ	S_Σ	δ_n
Альфа	0,95	1,7	0,14	0,61	0,08	1,98	3,96
Бета	0,65	1,7	0,18	1,36	0,02	1,98	3,97

Анализ составляющих погрешности передачи единицы АРН показал, что одной из основных является НСП, обусловленная неравномерностью активного слоя источников и детектора компаратора θ_K . θ_K возникает в тех компараторах, в которых чувствительность всего детектора в целом различна для разных участков активной поверхности источников. В основном неравномерность активного слоя нормируется для источников с активной поверхностью 100 и 160 см² (5П9, 5СО и 6П9, 6СО). Значение θ_K для указанных источников определяется в соответствии с [3, 4] по формуле:

$$\theta_K = 1,1 \sqrt{\eta_o^2 + \eta_n^2} \frac{s_o}{S_o} \frac{|1 - \xi' / \xi|}{1 - s_o / S_o} \quad (3)$$

где η_o и η_n – неравномерность активного слоя у эталонного и поверяемого источников соответственно (по паспорту $\eta \leq 20$ %), %;

s_o и S_o – площадь с максимальным отклонением АРН и площадь активной поверхности всего источника соответственно. Отношение s_o / S_o принимают равным 0,06 и 0,1 для источников с активной поверхностью 100 и 160 см² соответственно;

ξ' / ξ – относительное изменение чувствительности всего детектора для краевых участков источников по отношению к среднему при заданных расстояниях между источником и детектором.

Согласно [3, 4] отношение ξ' / ξ определяется перемещением источников в двух взаимно перпендикулярных направлениях в пределах площади активной поверхности источника с измерением скорости счёта импульсов n_i в каждой точке. Величины η_o и η_n определяются и нормируются только заводом-изготовителем источников в виде $\eta \leq 20$ %.

Предлагаемый метод уменьшения составляющей погрешности измерений активности радионуклидов, обусловленной неравномерностью активного слоя источников и чувствительности детектора, можно условно разделить на два этапа:

1) Определять значение ξ' / ξ перемещением источников минимальной площади в восьми направлениях относительно центра детектора.

2) В связи со сложностью и высокой трудоёмкостью определения точного значения η прямыми измерениями предлагается косвенно

оценивать величины η_o и η_n при вращении источников вокруг своей оси с измерением скорости счёта импульсов.

1-й этап. Отношение ξ'/ξ определялось перемещением источников 1П9 (1СО) и 2П9 (2СО) в восьми направлениях относительно центра детектора в пределах максимальной площади активной поверхности источника (6П9, 6СО) с измерением скорости счёта импульсов n_i от источника в каждой точке. Выбор большего количества направлений позволяет повысить достоверность определения ξ'/ξ и определить полную картину неравномерности чувствительности детектора. Отношение ξ'/ξ вычислялось по формуле:

$$\xi'/\xi = n_i/\bar{n} \quad (4)$$

где \bar{n} – среднее значение скоростей счёта импульсов по всем точкам, с^{-1} .

В качестве ξ'/ξ выбирается значение n_i/\bar{n} с наибольшим отклонением от единицы.

В ходе исследований компараторов на данном этапе определены значения неравномерности чувствительности детекторов и проведён расчёт значений θ_k для компараторов, которые показали, что определение относительного изменения чувствительности детектора при измерениях n_i от источников минимальной площади в восьми направлениях, а не в двух (как это предписывает [3, 4]), позволяет уменьшить θ_k до 45 %. При этом увеличение числа измерений n_i приводит к увеличению продолжительности поверки компаратора (на 15-20 %). Однако определение θ_k требуется лишь 1 раз в 2 года (срок межповерочного интервала компаратора). Поэтому на фоне средней загрузки компаратора при проведении поверки РЭ (≈ 400 РЭ в год) за указанный период времени данное увеличение трудозатрат ничтожно мало и составляет 0,1 %.

2-й этап. В общем случае неравномерность нанесения активного слоя источников η определяется согласно [5] путём измерений значений скорости счёта импульсов в i -ой точке поверхности источника и последующего определения их максимального отклонения относительно среднего значения скорости счёта импульсов. Данная величина для эталонных и поверяемых источников η_o и η_n определяется и нормируется только заводом-изготовителем источников в виде $\eta \leq 20$ % и при их дальнейшей эксплуатации не контролируется. Так, в [3, 4] не регламентируются методы определения η или оценка её влияния на составляющую НСП при проведении поверки источников ионизирующих излучений (ИИИ) типа 5П9 (5СО) и 6П9 (6СО). Однако согласно формуле (3), очевидно, что при условии более точного определения значения η можно добиться уменьшения θ_k .

Исследования проводились следующим образом. Для нивелирования вклада анизотропии источников в составляющую НСП необходимо:

а) зафиксировать первоначальное значение скорости счёта импульсов n_0 ;

б) непрерывно или бесконечно много раз поворачивать источник вокруг своей оси с шагом, стремящимся к нулю, до достижения угла в 360° ;

в) на каждом шагу проводить измерения n_i , определять среднее значение скорости счёта импульсов \bar{n} и погрешность измерений δ_i в каждой точке относительно n_0 ;

г) оценить уменьшение η_i .

Критерием наличия неравномерности активного слоя источника являлось не менее чем двойное превышение δ_i относительно значения нестабильности компаратора δ_{iH} . Затем для всех ИИИ определялись модули средних относительных НСП $\delta_{срi}$, величина которых в соответствии с [6] позволяет оценить вклад значения η в суммарную погрешность поверки РЭ АРН.

$$\delta_{срi} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \left(\left| \frac{(\bar{n} - n_i)}{\bar{n}} \right| 100 - |\delta_{iH}| \right)_i}{i} \quad (5)$$

Сделано допущение, что максимальное значение величины δ_i прямо пропорционально величине η . Данное допущение описывается зависимостью:

$$\eta = \kappa \delta_i \quad (6)$$

где κ – коэффициент пропорциональности, зависящий от неравномерности детектора (const. в пределах межповерочного интервала компаратора).

Поэтому, уменьшая δ_i на основе вращения источника в N раз, можно также получить уменьшение η в N раз. Данную величину можно оценить с помощью выражения:

$$N = \delta_i / \delta_{ср} \quad (7)$$

Экспериментальным исследованиям подверглись более 80 источников 5П9, 5СО и 6П9, 6СО. Результаты расчётов по оценке анизотропии источников приведены в таблице 2.

Таблица 2

№	Наименование характеристики	Значение характеристики, %			
		Для 5П9	Для 5СО	Для 6П9	Для 6СО
1	Доля неравномерных ИИИ	92	40	30	17
2	Диапазон δ_i	0,3 - 9,9	0,4 - 1,7	0,5 - 2,1	0,2 - 2,0
3	Диапазон $\delta_{ср}$	0,1 - 4,4	0,1 - 0,8	0,1 - 0,7	0,1 - 0,5
4	N_{\max}	2,25	2,13	3	4

Экспериментальная апробация предложенного метода показала, что оценка анизотропии источников позволяет уменьшить θ_k на 20-80 %. Данные измерения достаточно проводить один раз за весь срок эксплуатации источников.

Полученные с помощью вышеуказанного метода результаты были подтверждены на аппаратуре воспроизведения единиц активности и внешнего излучения альфа-бета-излучающих радионуклидов из состава вторичного эталона.

Таким образом, в результате проведённых исследований определено, что применение предложенного метода при периодической поверке компараторов и радиометрических источников позволяет уменьшить погрешность передачи единицы АРН на 5-10 %.

Литература

1. Юдин М.Ф., Кармалицин Н.И. и др. Измерения активности радионуклидов. –Екатеринбург: Полиграфист, 1999;
2. Караваев Ф.М. Измерения активности радионуклидов. –М.: Изд-во стандартов, 1972;
3. ГОСТ 8.581-2003. Источники альфа-излучения радиометрические эталонные. Методика поверки. –М.: Издательство стандартов, 2003. – 13 с.;
4. ГОСТ 8.582-2003. Источники бета-излучения радиометрические эталонные. Методика поверки. –М.: Издательство стандартов, 2003. – 13 с.;
5. Демченко Н.Ф. Разработка средств и методов радиационного контроля при производстве радионуклидных источников. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. –Дмитровград, 2007;
6. Кондрашов А.П., Шестопалов Е.В. Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерений. – М.: Атомиздат, 1977. – 200 с.

РАЗРАБОТКА ПЛЁНОЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО ДОЗИМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЁННЫХ ДОЗ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 5 ДО 60 КГР

Емельяненко И.А., Гурский М.Н., Громов А.А., Тенишев В.П.,
Жанжора А.П., Абдулов Р.А.

ФГУП «ВНИИФТРИ»

emelyanenko@vniiftri.ru

В данной работе рассматривается разработка чувствительной, стабильной и устойчивой радиохромной композиции на основе азокрасителя 4-диметиламиноазобензола с целью создания Государственного стандартного образца для измерения поглощённой дозы фотонного и электронного излучений в диапазоне от 5 до 60 кГр.

При исследовании проводилось облучение различных плёночных композиций на Государственном первичном специальном эталоне единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий ГЭТ 209-2014 (ФГУП «ВНИИФТРИ»). Пленочные образцы представляют собой полимерные пленки, состоящие из радиационно-чувствительного слоя, нанесённого на прозрачный лавсан толщиной 100 мкм. Они изготавливались на специальных поливочных машинах, соблюдая строго температуру и влажность в ЗАО БИТ г. Переславль-Залесский.

В работе использовался спектрофотометрический метод измерения. Проводилось измерение оптической плотности облучённых образцов по отношению к необлучённому на спектрофотометре SPECORD 210 Plus компании Analytik Jena с абсолютной погрешностью 0,2 % по пропусканию. Далее по полученным экспериментальным данным проводилось построение градуировочной характеристики зависимости оптической плотности облучённых образцов от величины поглощённой дозы. При облучении экспериментальных образцов спектр оптического поглощения, характерный для данного азокрасителя, не деформируется в области длины волны 540 нм в зависимости от величины поглощённой дозы, что позволяет использовать данный краситель и выбрать длину волны 540 нм в качестве рабочей для последующих измерений.

В результате экспериментов был сделан вывод, что для данного диапазона доз подходит радиохромная композиция с концентрацией красителя: 5 или 6 г, толщиной радиационно-чувствительного слоя 8 мкм и с концентрацией гексахлорэтана 4,3 г в растворе. Для данной плёнки был

обнаружен большой «постэффект». В связи с большим «постэффектом» за 1 сутки в дальнейшем для уменьшения «постэффекта» было принято решение исследовать радиохромную композицию без гексахлорэтана со стабилизирующими добавками: фенол, бензол. В результате экспериментов был сделан вывод, что введение стабилизирующей добавки в виде бензола уменьшает «постэффект» на 2 %.

В итоге работы для дальнейших исследований принята к рассмотрению радиохромная композиция с толщиной радиационно-чувствительного слоя от 8 до 10 мкм, в которой в качестве азокрасителя выступает 4-диметиламиноазобензол с массой 7 г в растворе без гексахлорэтана и с бензолом в качестве стабилизирующей добавки.

ЭТАЛОНЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рогозев А.Б., Тычинкин Ю.А., Титов Э.А.

ЗАО «РИТВЕРЦ»

Вступление

Как известно, одной из задач метрологии является создание эталонов.

В метрологии измерений ионизирующих излучений, как правило, используются эталоны активности и потока фотонов (частиц).

ЗАО «РИТВЕРЦ», занимаясь разработкой и изготовлением радионуклидной продукции, значительное внимание уделяет эталонным, калибровочным и контрольным источникам разных типов. В большинстве случаев, когда речь идет об эталонах, мы производим данную продукцию в кооперации с ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (ВНИИМ). За годы многолетнего сотрудничества мы организовали плодотворное взаимодействие по следующим направлениям:

1. Источники типа ОСГИ-Р и ОСГИ-РТ. Конструкция источников разработана много лет назад и всем хорошо знакома. До настоящего времени мы выпускали только источники типа ОСГИ-Р. Проанализировав рынок выпускаемых в России и за рубежом эталонных источников и изучив пожелания потребителей, мы внесли некоторые доработки в конструкцию и технологию, что привело к созданию нового типа ОСГИ-РТ. Отличия источников ОСГИ-РТ заключаются в следующем:

- увеличены классы прочности – 35242 вместо 35141,
- к номенклатуре добавлены мультинуклидные источники,
- добавлены эталоны 0-го разряда.

Идея мультинуклидного источника не нова и заключается в том, что довольно часто при оперативной калибровке (поверке) спектрометрической аппаратуры может возникать потребность в измерении сразу нескольких радионуклидов. Для этой цели нами был разработан и выпускается источник, содержащий четыре радионуклида (Y-88, Ba-133, Eu-152, Am-241). Естественно, возможны и другие комбинации по составу радионуклидов. Также в последнее время все более актуальной становится задача производства и поставки для предприятий отрасли вторичных эталонов активности (рабочих эталонов 0-го разряда). Для этого на базе ОСГИ-РТ разрабатываются источники с погрешность аттестации не более 1.5 % ($p=0.95$).

Разработка и изготовление источников типа ОСГИ-РТ идет в тесном сотрудничестве с ВНИИМ, начиная со стадии эталонирования исходных растворов и заканчивая аттестацией источников. Таким образом, у пользователей ОСГИ-РТ появляется возможность дополнительно иметь:

- гарантию работоспособности источников в более жестких условиях эксплуатации;

- мультинуклидные источники, которые позволяют измерять сразу нескольких радионуклидов, что снижает систематическую погрешность измерений и уменьшает время калибровки спектрометра;

- эталоны активности 0-го разряда, которые дают возможность использовать эти источники для работ по калибровке/поверке источников фотонного излучения, аттестуемых по 1-му и 2-му разрядам.

2. Источники типа ОСГИ-П, которые являются альтернативой привычным источникам типа ОСГИ-Р на пленках. Актуальность источника возникает тогда, когда появляются задачи по упрочнению корпуса и минимизации размеров активной части при сохранении привычных геометрических размеров.

Признавая несомненно большие достоинства данной конструкции, нельзя не отметить и явный недостаток – поглощение фотонного излучения в материале источника и активной части. Хотя используемые материалы – оргстекло и пористая керамика ВеО – имеют небольшую плотность, но в области малой энергии ослабление будет заметным.

Для определения величины поглощения была проведена совместная работа с ВНИИМ, где использовались как расчетный, так и экспериментальный пути. В результате мы получили коэффициенты пропускания фотонного излучения для всех радионуклидов, входящих в номенклатуру источников типа ОСГИ.

Для учета ослабления выхода фотонов из источников ОСГИ-П программа SpectraLineXX (ООО «ЛСРМ», п. Менделеево) была адаптирована путем внесения соответствующего материала (полиметилакрилат) в базу используемых материалов, что позволило использовать их для калибровки детекторов по эффективности регистрации.

Таким образом, конструкция источников ОСГИ-П предоставляет дополнительные возможности:

- гарантировать работоспособность источников в жестких условиях эксплуатации,

- за счет значительного упрочнения корпуса источника получить возможность закладывать повышенные номиналы активности по сравнению с источниками на пленках – увеличить назначенный срок службы источников.

На данный момент источники не внесены в реестр СИ, что ограничивает область их применения функциями контроля и калибровки.

3. Источники типа ОИДК-Р были разработаны для обеспечения процедур контроля и калибровки радионуклидных калибраторов, активно применяемых в ядерной медицине. Они применяются для периодического

контроля чувствительности и долговременной стабильности измерений таких хорошо известных приборов как «CURIEMENTOR 2-4», РИС А1 и др. в соответствии с рекомендациями ГОСТ ИЕС 61303-2011. Исторически сложилось, что используются два разных дизайна, и оба представлены в нашей номенклатуре.

Источники ОИДК-Р выпускаются как контрольные (суммарная погрешность 5 - 7 %), так и калибровочные, с оформлением сертификата о калибровке во ВНИИМ с погрешностью до 3 %.

Таким образом, источник в первом случае служит для регулярной проверки работоспособности, а во втором для периодической поверки приборов.

4. Кроме радионуклидных источников, мы выпускаем **ОРР** (эталонные радионуклидные растворы), которые производятся на базе гамма-излучающих радионуклидов. Приготовление растворов нужной консистенции, взвешивание и упаковка в первичную фасовку проводится нашей фирмой, а аттестация с выдачей или свидетельства или сертификата о калибровке ОРР – ВНИИМ. Для изготовления ОРР используются растворы азотной или соляной кислоты нужной молярности. В номенклатуру растворов входят до 19 радионуклидов. Учитывая разнообразные требования к объему раствора, возможен широкий спектр первичной упаковки растворов.

Заключение. Это основные проекты, по которым сегодня идет активное взаимодействие ЗАО «РИТВЕРЦ» с ВНИИМ. На основании опыта нашего взаимодействия, можно наблюдать определенные преимущества такой кооперации, когда каждая из сторон специализируется на своей части производственного процесса. Таким образом, могут достигаться максимально возможное качество выполняемых работ и экономический эффект.

ПРИМЕНЕНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ФОТОННОГО И ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ ПРОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Берлянд

ФГУП «ВНИИФТРИ»

sander.00007@gmail.com

Протонная терапия является эффективной альтернативой лучевой терапии с использованием высокоэнергетического фотонного и электронного излучений. Ее преимущество обусловлено наличием в глубинном распределении поглощенной дозы в среде пика Брэгга, где поглощенная доза имеет максимальное значение, крутыми градиентами дозного распределения и отсутствием излучения за пиком Брэгга, а также незначительным боковым рассеянием протонов. Добавляя перед облучаемым объектом дополнительные слои материала, можно сдвигать пик Брэгга, останавливая пучок протонов на заданной глубине проникновения в соответствии с местоположением облучаемой мишени.

Стандартная дозиметрия протонного излучения базируется на применении калориметров, ионизационных камер (ИК), цилиндров Фарадея, активационных детекторов [1, 3, 4]. Для относительной дозиметрии на протонных пучках, кроме ИК, используются кремниевые полупроводниковые детекторы (ППД) [2], алмазные и аланиновые детекторы [1]. Для обеспечения единства дозиметрических измерений протонного излучения необходимо обеспечить прослеживаемость результатов измерений до национального первичного эталона. На сегодняшний день национальных эталонов, воспроизводящих единицу поглощенной дозы протонного излучения, не существует. В России применяется Государственный первичный эталон поглощенной дозы фотонного и электронного излучений ГЭТ 38-2011 и соответствующая Государственная поверочная схема для средств измерений поглощенной дозы [5]. В докладе рассматриваются результаты дозиметрии клинического протонного излучения на ускорителе синхротрона Института Теоретической и Экспериментальной Физики (ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт»), полученные с помощью ионизационной камеры, комплекта термолюминесцентных детекторов, калиброванных в поле гамма-излучения Co-60 на Государственном первичном эталоне ГЭТ 38-2011 во ФГУП «ВНИИФТРИ» и аппаратно-измерительного комплекса ИТЭФ. Специфика протонного пучка синхротрона ИТЭФ заключается в том, что импульсы излучения редкие – один раз в 4 с и

короткие – длительность импульса 100 нс. В каждом импульсе $10^9 - 10^{11}$ протонов. Поэтому мощность поглощенной дозы в импульсе очень высокая.

Ионизационная камера и термолюминесцентные дозиметры при калибровке размещались в водном фантоме на глубине 5 г/см². В результате калибровки были установлены коэффициенты чувствительности для этих дозиметров:

для ионизационной камеры:

$$N_{ИКСо-60} = D_{Со-60} / M_{ИКСо-60} \quad (1)$$

для ТЛД:

$$N_{ТЛДСо-60} = D_{Со-60} / M_{ТЛДСо-60} \quad (2)$$

где $D_{Со-60}$ – значение поглощенной дозы гамма-излучения Со-60 в воде в точке водного фантома, определенное с помощью калориметра;

$M_{ИКСо-60}$ и $M_{ТЛДСо-60}$ – показания ионизационной камеры и ТЛД в поле гамма-излучения Со-60 соответственно.

При измерениях в поле протонного пучка ППД ионизационная камера и ТЛД размещаются в водном фантоме в точке, находящейся на середине плато модифицированного пика Брэгга. Значение поглощенной дозы протонного излучения в воде $D_{пр}$ при использовании ионизационной камеры определяется в соответствии с рекомендациями [8] из соотношения:

$$D_{пр} = \frac{M_{ИК пр}}{N_{ИК Со-60}} \cdot \frac{W_{пр}}{W_{Со-60}} \cdot \frac{S_{\rho \text{ вод, возд пр}}}{S_{\rho \text{ вод, возд Со-60}}} \cdot P_{пр} \cdot K_p \quad (3)$$

где $M_{ИК пр}$ – показания дозиметра с ионизационной камерой в протонном пучке;

$W_{пр}$ – энергия ионообразования в воздухе для протонов;

$W_{Со-60}$ – энергия ионообразования в воздухе для гамма-излучения;

$S_{\rho \text{ вод, возд пр}}$ – отношение тормозных способностей воды и воздуха для протонов;

$S_{\rho \text{ вод, возд Со-60}}$ – отношение тормозных способностей воды и воздуха для гамма-излучения Со-60;

K_p – поправочный коэффициент на рекомбинацию ионов;

$P_{пр}$ – коэффициент возмущения флюенса протонов в результате внесения

ионизационной камеры в водный фантом.

Для протонного пучка синхротрона использовалась плоскопараллельная ионизационная камера типа PRC05. Выбор типа

камеры обусловлен стремлением уменьшить составляющую погрешности результата измерений, обусловленную рекомбинацией ионов в ионизационной камере: межэлектродный зазор в камере, составляет всего 0,8 мм. Мощность дозы в импульсе большая – более 10^4 Гр/с. Ионизационная камера типа PRC05 имеет очень маленький объем – $0,05 \text{ см}^3$. Поэтому при одинаковой эффективности собирания ионов эта камера позволяет измерять мощности дозы на 3 порядка больше, чем наперстковые фермеровские камеры. Поправочный коэффициент на рекомбинацию ионов для импульсного пучка определяется с помощью метода двух напряжений [13], в соответствии с которым существует линейная зависимость между обратными значениями ионизационного тока и высокого напряжения на камере. Для всех пучков фотонов и электронов принято значение $W_{Co-60} = 33,97 \text{ Дж/Кл}$ [9-11], для протонного излучения рекомендовано значение $W_{np} = 34,23 \text{ Дж/Кл}$ [5].

Значение $S_{\rho}^{вод, возд Co-60}$ составляет 1,133 для гамма-излучения Co-60.

Это значение было рассчитано с применением данных о тормозных способностях моноэнергетических электронов, приведенных в МКРЕ-37 [12]. Для протонного излучения данного качества в TRS 398 [8] рекомендовано значение $S_{\rho}^{вод, возд np}$ равное 1,137. Возмущением

флюенса протонов ионизационной камерой можно пренебречь и считать $P_{np} = 1$ (TRS 398).

Значение поглощенной дозы протонного излучения в воде D_{np} при использовании ТЛД определяется из схожего соотношения:

$$D_{np} = \frac{M_{ТЛД np}}{N_{ТЛД Co-60}} \cdot \frac{W_{np LiF}}{W_{Co-60 LiF}} \cdot \frac{S_{\rho}^{вод, LiF np}}{S_{\rho}^{вод, LiF Co-60}} \cdot P_{np} \quad (4)$$

где $M_{ТЛД np}$ – показания ТЛД в протонном пучке;

$W_{np LiF}$ – энергия возбуждения для LiF для протонов;

$W_{Co-60 LiF}$ – энергия возбуждения для LiF для гамма-излучения;

$S_{\rho}^{вод, LiF np}$ – отношение тормозных способностей воды и LiF для протонов;

$S_{\rho}^{вод, LiF Co-60}$ – отношение тормозных способностей воды и LiF для гамма-излучения Co-60;

$R_{пр}$ – коэффициент возмущения флюенса протонов в результате внесения ТЛД в водный фантом.

Бюджет неопределенности определения поглощенной дозы протонного излучения в воде с помощью ионизационной камеры (типа В с коэффициентом расширения $K = 2$) приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Бюджет неопределенности определения поглощенной дозы протонного излучения в воде.

Источник неопределенности	Значение расширенной неопределенности, %
Калибровочный коэффициент ИК по поглощенной дозе в воде для $Co-60 - N_{ИКCo-60}$	1,0
Отношение тормозных способностей воды и воздуха для протонного излучения и гамма-излучения $Co-60$ $\frac{S \rho_{вод,возд,пр}}{S \rho_{вод,возд,Co-60}}$	2,2
Соответствие $\frac{S \rho_{вод,возд,пр}}{S \rho_{вод,возд,Co-60}}$ качеству пучка	0,8
Отношение энергии ионообразования в воздухе для гамма-излучения и протонного излучения $\frac{W_{пр}}{W_{Co-60}}$	0,5
Коэффициент возмущения $R_{пр}$	0,4
Стабильность дозового монитора	0,5
Поправка на рекомбинацию, давление, температуру	0,2
Суммарное значение	2,7

Неопределенность типа А, выраженная в виде СКО, составляет 0,5 %, расширенная неопределенность типа А составляет 1 % ($K = 2$).

Суммарная неопределенность результата определения поглощенной дозы протонного излучения в воде с помощью ионизационной камеры составляет 2,8 %. Аналогичные расчеты при использовании ТЛД (одновременно облучается комплект из 25 детекторов) дают значения суммарной неопределенности определения поглощенной дозы в воде 4,5 %. Калибровка проводилась при начальной энергии протонного пучка, выводимого из кольца ускорителя $E_0 = 220$ МэВ. Средняя энергия протонного пучка после всех элементов формирования поля была $E = 200$ МэВ.

Относительная погрешность определения использованных в работе кремниевых полупроводниковых детекторов (ППД) оценивается менее чем

в 2 %. Отсюда суммарная погрешность определения величины поглощенной дозы в воде от протонного излучения в диапазоне энергий E_p (50-200) МэВ с помощью АИК не превышает 4,3 %.

Результаты измерений поглощенной дозы протонного излучения в точке водного фантома с использованием различных методов и средств измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений поглощенной дозы протонного излучения.

Средство измерений	Измеренное значение поглощенной дозы, Д, сГр	Расширенная неопределенность результата измерений, U, %
Ионизационная камера	21,00	2,7
ТЛД	20,51	4,5
АИК	20,77	4,3

Из таблицы видно, что результаты измерений, полученных с помощью ионизационной камеры и ТЛД, прокалиброванных на Государственном первичном эталоне поглощенной дозы фотонного излучения, в поле гамма-излучения Co-60, и с помощью независимого метода, основанного на определении флюенса протонного излучения с помощью активационного детектора, совпадают в пределах оцененных неопределенностей.

Литература

- 1 ICRU 2007 Prescribing, recording, and reporting proton-beam therapy. ICRU Report 78 (Oxford: Oxford University Press)
- 2 Koehler, A.M. Dosimetry of proton beams using small diodes, Radiat. Res. Suppl.7 (1967) 53.
- 3 Verhey, L., et al., The determination of the absorbed dose in a proton beam for purpose of charged-particle radiation therapy, Radiat. Res.79 (1979) 34-54.
- 4 Vynckier, S., et al., The proton therapy program at the cyclotron Cyclone of Louvain-la-Neuve (first dosimetric results), J. Eur. Radiother. 5 (1984) 245-247.
- 5 Берлянд А.В. Государственный первичный эталон единиц мощности поглощенной дозы фотонного и электронного излучений, его совершенствование и результаты ключевых сличений / А.В. Берлянд, В.А. Берлянд, Ю.И. Брегадзе // Измерительная техника. – Москва: Стандартинформ, 2010. – №2. – с. 3.

- 6 Nichiporov D., et al. Measurement of the activity of ^{11}C and ^{22}Na sources using 4- π - β - γ coincidence system. *Appl. Radiat. Isot.* 60. 2004, p.703-716
- 7 V. Kostjuchenko, D. Nichiporov. Measurement of the $^{12}\text{C}(\text{p,pn})^{11}\text{C}$ reaction from 95 to 200 MeV. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 44, 9, 1993, p. 1173-1175.
- 8 IAEA TRS-398 Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water: Technical report. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000.
- 9 Boutillon, M. Re-evaluation of the W for electrons in dry air // M. Boutillon, A.M. Perroche-Roux // *Phys. Med. Biol.* – 1987. – № 32
- 10 CCEMRI(I) Effect of a change of stopping-power values on the w values recommended by ICRU for electrons in dry air: Report. – Paris: BIPM, 1985.
- 11 Niatel, M.T. Two determinations of W for electrons in dry air / M.T. Niatel, A.M. Perroche-Roux, M. Boutillon // *Phys. Med. Biol.* – 1985. – № 30.
- 12 ICRU Stopping Powers for Electrons and Positrons: Report № 37. – Bethesda, MD: ICRU, 1984.
- 13 IAEA TRS-277 Absorbed dose determination in photon and electron beams: An international code of practice: Technical report. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1987.
- 14 Ничипоров Д.Ф. Абсолютная дозиметрия медицинского протонного пучка ИТЭФ на основе активационного метода. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, ИТЭФ, М, 2001

КАЛИБРОВКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО БЛОКА-КОМПАРАТОРА В НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ПОЛЯХ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО МОЩНОСТИ ДОЗЫ

Лукашевич Р.В., Гузов В.Д., Кожемякин В.А.

Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»

г. Минск, Республика Беларусь

lukashevich@atomtex.com

Рассмотрен метод калибровки сцинтилляционного блока-компаратора по мощности дозы в низкоинтенсивных полях фотонного излучения для задач радиационного мониторинга согласно рекомендациям международных технических стандартов. Представлены основные результаты исследований чувствительности детектора к различным компонентам фонового излучения, и апробация методики калибровки блока-компаратора на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ». Приведены результаты калибровки блока-компаратора в низкофоновой лаборатории в соляной шахте в Румынии.

Введение

Измерение мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) на уровне естественного радиационного фона является одной из основных задач радиационного мониторинга. При осуществлении радиационного мониторинга крайне важно получать информацию о малейшем превышении техногенного радиационного фона по отношению к естественному фоновому излучению. Для этого необходимо использовать измерительные средства, обладающие высокой чувствительностью, низким уровнем собственного фона и высокой временной стабильностью. В этом случае важной проблемой, которую необходимо решить при калибровке дозиметрических приборов, является нижний уровень измерительного диапазона, который должен включать значения, соответствующие естественному фону окружающей среды, т.е. 0,05 - 0,1 мкЗв/ч.

Использование высокочувствительных дозиметров на базе сцинтилляционных блоков детектирования становится привлекательным для оценки МАЭД ниже 0,1 мкЗв/ч. При том, что ГОСТ Р 8.804-2012 [1] не оговаривает диапазон измерений ниже 0,3 мкЗв/ч, стандарты ИЕС 61017:2016 и ИЕС 60846-1:2009 [2, 3] рекомендуют нижний предел диапазона измерений МАЭД при контроле радиационной обстановки в окружающей среде на уровне 0,03 мкЗв/ч.

В этой связи возникает необходимость в калибровке дозиметров по фотонному излучению в диапазоне 0,03 - 0,1 мкЗв/ч. Для этого необходимо метрологически обеспечить значение МАЭД на уровне 0,03 - 0,1 мкЗв/ч,

т.е. создать эталонное низкоинтенсивное поле фотонного излучения и экспериментально подтвердить линейность дозовой характеристики дозиметрических приборов в области ниже 0,1 мкЗв/ч.

Средства измерения

Для проведения калибровки эталонных полей рентгеновского и гамма- излучений поверочных дозиметрических установок методом сличения в УП «АТОМТЕХ» был разработан высокочувствительный блок-компаратор фотонного излучения БКМГ-АТ1102 на базе серийно выпускаемого сцинтилляционного блока детектирования БДКГ-05К со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) Ø40x40 мм (рисунок 1).

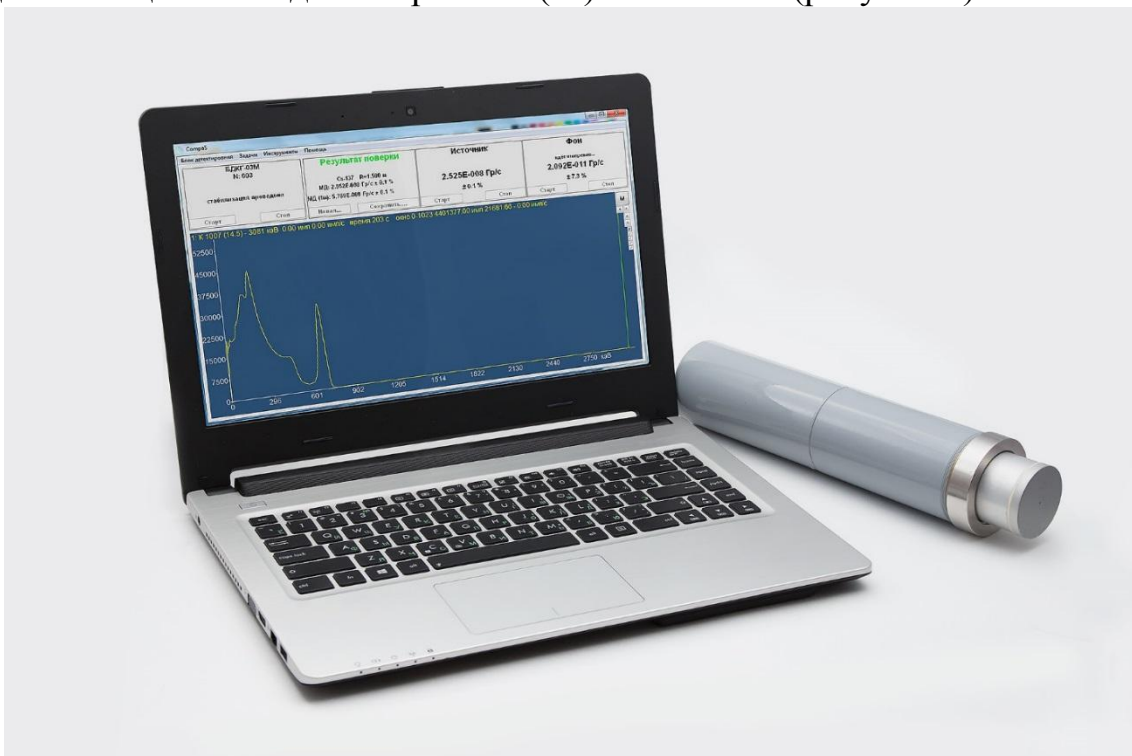


Рисунок 1. Блок-компаратор фотонного излучения БКМГ-АТ1102 и ПК со специализированным ПО

Накопленная при регистрации фотонного излучения информация обрабатывается средствами программного обеспечения и выводится на экран ПК в виде мощности дозы и аппаратурных спектров фотонного излучения.

При измерении мощности дозы использован спектрометрический метод преобразования аппаратурных спектров непосредственно в мощность дозы с помощью корректирующих весовых коэффициентов, значения которых зависят от амплитуды регистрируемых импульсов [4]. В блоке-компараторе реализована возможность измерять в единицах мощности кермы в воздухе, МАЭД и мощности экспозиционной дозы.

Апробация блока-компаратора БКМГ-АТ1102 в качестве средства измерения мощности дозы проведена на поверочной дозиметрической установке УДГ-АТ110 в УП «АТОМТЕХ» [5] с использованием источников гамма-излучения ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs и ^{60}Co . В результате проведенных измерений были определены основные метрологические характеристики блока-компаратора.

Для подтверждения метрологических характеристик были проведены исследования основных характеристик блока-компаратора, а также калибровка по мощности кермы в воздухе в диапазоне 0,1 – 300 мкГр/ч были выполнены во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» на государственных эталонах РФ [6].

Метод исследования

Компания «АТОМТЕХ» выпускает широкий спектр аппаратуры для радиационного контроля и ядерных измерений, в том числе высокочувствительные сцинтилляционные блоки детектирования с функцией дозиметра, поэтому задача создать низкоинтенсивные поля фотонного излучения для проверки дозовой характеристики выпускаемых дозиметров, устройств и систем в диапазоне 0,03 - 0,1 мкЗв/ч весьма актуальна.

Из-за ограничений чувствительности ионизационных камер в области малых уровней мощностей доз, входящих в состав государственных эталонов, а также существенного вклада фонового излучения при измерениях ниже 0,1 мкГр/ч, диапазон аттестованных значений мощности кермы в воздухе на эталонных установках во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» начинается с 0,1 мкГр/ч. Существенный вклад в мощность дозы при измерениях ниже 0,1 мкЗв/ч (мкГр/ч) будет составлять окружающий радиационный фон. В таком случае калибровка или поверка средств измерения в обычных лабораторных условиях практически не возможна, т.к. радиационный фон в лаборатории может изменяться во время проведения измерений из-за множества факторов, что может вносить существенный вклад в результаты измерения около фоновых значений мощности дозы.

Для выполнения калибровки в области ниже 0,1 мкЗв/ч (мкГр/ч), была разработана и апробирована методика калибровки блока-компаратора БКМГ-АТ1102 в низкоинтенсивных полях фотонного излучения по мощности дозы согласно рекомендациям ИЕС 61017:2016 и ИЕС 60846-1:2009.

Была разработана и апробирована методика калибровки низкоинтенсивных полей гамма-излучения, создаваемых радионуклидным источником ^{137}Cs , в низкофоновой камере по мощности дозы в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч с использованием блока-компаратора. Процедура

калибровки сопряжена с корректным измерением и учетом радиационного фона в низкофоновой камере и использованием компенсационного метода измерений (без источника и с источником излучения по разностному эффекту).

Результаты исследований

Апробация разработанных методик калибровки была выполнена на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ».

Заславское водохранилище расположено в 10 км к северо-западу от Минска, на северо-восточных склонах Минской возвышенности. Наибольшая ширина 4,5 километра, наибольшая длина 10 километров. Предварительно была найдена карта глубин Заславского водохранилища и проложен маршрут, максимально удаленный от берегов и максимальной глубиной дна. При проведении измерений использовалась стеклопластиковая лодка типа «Русалка-2», для минимизации вклада при измерении радиационного фона окружающей среды.

В результате были определены отклики блоков-компараторов на составляющие окружающего радиационного фона, согласно рекомендациям технических стандартов, и выполнены предварительная калибровка блока-компаратора на Заславском водохранилище с использованием точечного источника гамма-излучения типа ОСГИ с радионуклидом ^{137}Cs .

Для того чтобы проверить, насколько показания прибора согласуются с характеристиками поля гамма-излучения в точке измерения, нужно рассчитать, для различных расстояний от источника до прибора, значения мощности дозы и сравнить их с показаниями прибора. Для расчета расстояния используется керма-постоянная для единиц мощности кермы в воздухе (гамма-постоянная - для единиц МАЭД) для конкретного радионуклида (в нашем случае - ^{137}Cs).

Значения мощности дозы, рассчитанные таким образом для разных расстояний между источником и блоком-компаратором принимались за действительные значения мощности дозы. Затем на рассчитанных расстояниях выполнялись измерения мощности дозы с использованием блока детектирования из состава блока-компаратора (рисунок 2).



Рисунок 2. Измерение мощности кермы в воздухе от источника гамма-излучения ^{137}Cs на лодке с использованием блока-компаратора БКМГ-АТ1102 на Заславском водохранилище

Для блока-компаратора гамма-излучения БКМГ-АТ1102 были определены три калибровочные точки для источника гамма-излучения с радионуклидом ^{137}Cs и рассчитаны расстояния от источника до детектора с использованием гамма-постоянной для радионуклида ^{137}Cs . В данных расчетных точках проводили измерения мощности дозы.

Были выполнены измерения мощности дозы в рассчитанных точках с источником и без источника излучения. Путем нахождения разности между значениями мощности дозы с источником и без источника излучения, была определена чувствительность блока-компаратора к излучению источника гамма-излучения типа ОСГИ с радионуклидом ^{137}Cs .

Далее были рассчитаны значения радиационного фона для блока-компаратора при помощи экстраполяции показаний к нулевой мощности дозы от источника излучения. Полученные значения радиационного фона путем экстраполяции показаний приборов к нулевой мощности дозы от

источника излучения (рисунок 6) хорошо согласуются с измеренными значениями радиационного фона: $5,688 \pm 0,380$ нГр/ч против $5,15 \pm 0,69$ нГр/ч.

Апробация методики калибровки блока-компаратора была проведена и в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ». Низкофоновая камера конструктивно выполнена из пластин железа толщиной 1 см, полости между которыми заполнены свинцом толщиной 5 см. Снаружи камера дополнительно усилена свинцом (~ 5-7 см) и предназначена для определения собственного фона блоков детектирования и проведения около фоновых измерений мощности дозы от точечных источников гамма-излучения типа ОСГИ в условиях низкого радиационного фона.



Рисунок 3. Общий вид низкофоновой камеры

Сравнительный анализ полученных аппаратных спектров и результатов измерения мощности кермы в воздухе от точечного источника гамма-излучения типа ОСГИ с радионуклидом ^{137}Cs , полученных с использованием блока-компаратора на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере (за вычетом радиационного фона), показал возможность проведения измерений и калибровок с использованием

точечных источников гамма-излучения в низкофоновой камере (рисунок 4).

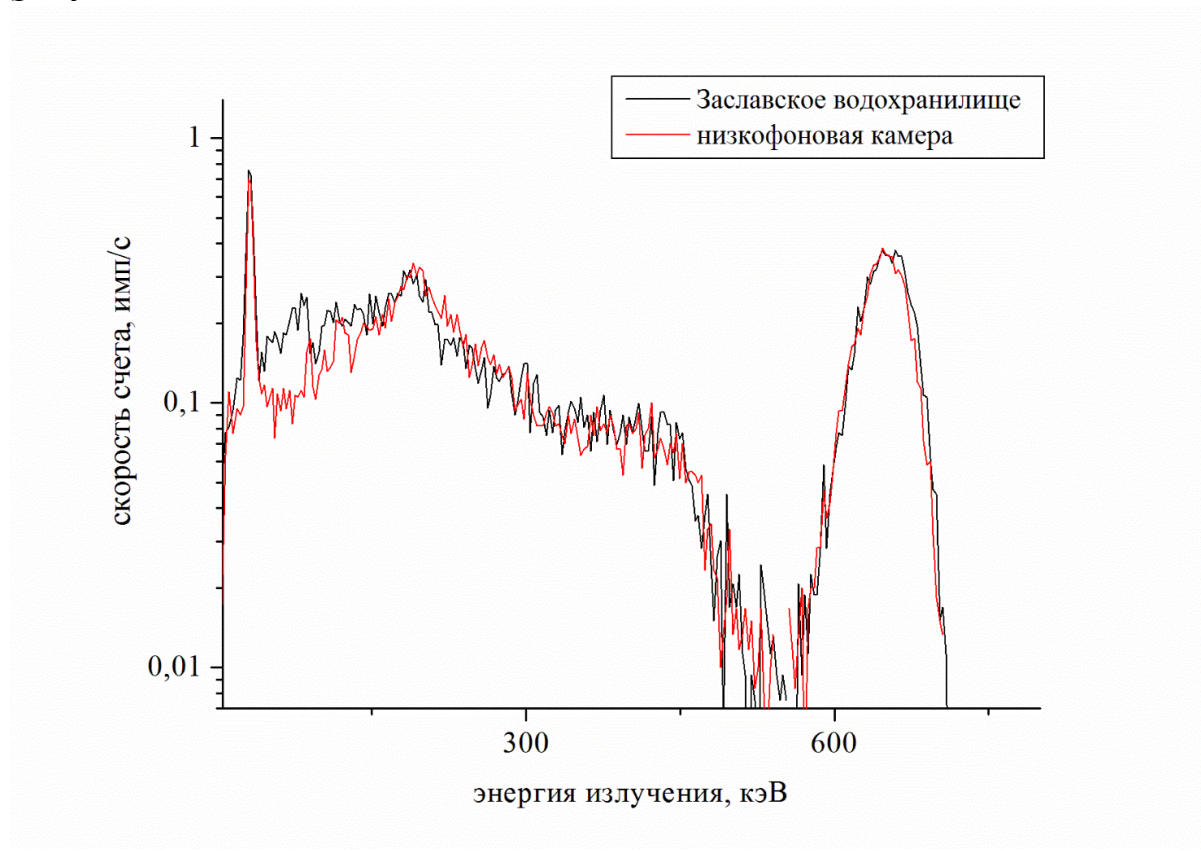


Рисунок 4. Приведенные к одному времени аппаратные спектры от точечного источника гамма-излучения ^{137}Cs при расчетной МАЭД 0,03 мкЗв/ч на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере

Как и на Заславском водохранилище, для блока-компаратора гамма-излучения БКМГ-АТ1102 были определены три калибровочные точки и выполнены измерения мощности дозы и определены чувствительности блоков-компараторов к излучению источника гамма-излучения типа ОСГИ с радионуклидом ^{137}Cs .

В результате, в расчетных точках были определены калибровочные коэффициенты для блока-компаратора при проведении измерений с использованием точечного источника гамма-излучения типа ОСГИ с радионуклидом ^{137}Cs (таблица 1).

Полученные значения радиационного фона путем экстраполяции показаний приборов к нулевой мощности дозы от источника излучения (рисунок 8) хорошо согласуются с измеренными значениями радиационного фона при наличии источника излучения за защитным свинцовым экраном: $3,583 \pm 0,532$ нГр/ч против $3,64 \pm 0,51$ нГр/ч.

Калибровка блока-компаратора в эталонных низкоинтенсивных полях фотонного излучения (0,03 – 0,1 мкЗв/ч) была выполнена в Румынии

в низкофоновом соляном руднике Unirea с использованием вторичного эталона мощности дозы методом компаратора.

Рудник Unirea расположен на глубине 208 м под поверхностью земли, что соответствует толщине водного эквивалента 620 м. Сама шахта представляет собой куполообразную структуру, состоящей из большого количества галерей шириной 34-36 м и высотой 54-58 м (рисунок 5). Следует отметить замечательную стабильность микроокружения, характеризующегося постоянной температурой в течение всего года $12,5 \pm 0,5$ °С, относительной влажностью 60-65% и атмосферным давлением 730 мм рт. ст. (973,25 гПа).

В 2006 году в шахте была построена и полностью введена в эксплуатацию лаборатория SPLBRL Национального научно-исследовательского института физики и ядерной инженерии им. Хория Хулубея (IFIN-НН). Чтобы не вносить дополнительный вклад в фоновое излучение, лаборатория была построена полностью из поливиниловых профилей. Поскольку уровень фонового излучения в лаборатории достаточно низок, присутствие персонала вблизи детекторов приводит к его увеличению. Чтобы избежать таких нежелательных эффектов, каждая комната отделена от соседних стенами толщиной 0,5 м, изготовленных также из поливиниловых профилей, пространство между которыми заполнено солью высокой чистоты. Температура в лаборатории поддерживается на уровне 20 ± 2 °С.

Внутри лаборатории МАЭД составляет $1,4 \pm 0,3$ нЗв/ч, что представляет собой идеальные условия для низкофоновых исследований. Нейтронно-активационный анализ породы, проведенный в ОИЯИ в г. Дубне (Российская Федерация), не показал заметных следов калия и тория, а концентрация урана в породе составляет около 1 млн^{-1} [7]. В лаборатории установлен калибровочный стенд для решения различных задач по калибровке дозиметрических приборов. Стенд был спроектирован, следуя тем же требованиям, что применялись к стенду в Underground Dosimetry Laboratory (UDO), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) [8]. Стенд оснащен радионуклидными источниками низкой активности ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am .

Для исследования метрологических характеристик стенда использовался калиброванный в низкофоновой лаборатории UDO в PTB прибор AUTOMESS 6150 AD-6 со сцинтилляционным детектором 6150 AD-b/H в качестве вторичного эталона МАЭД.

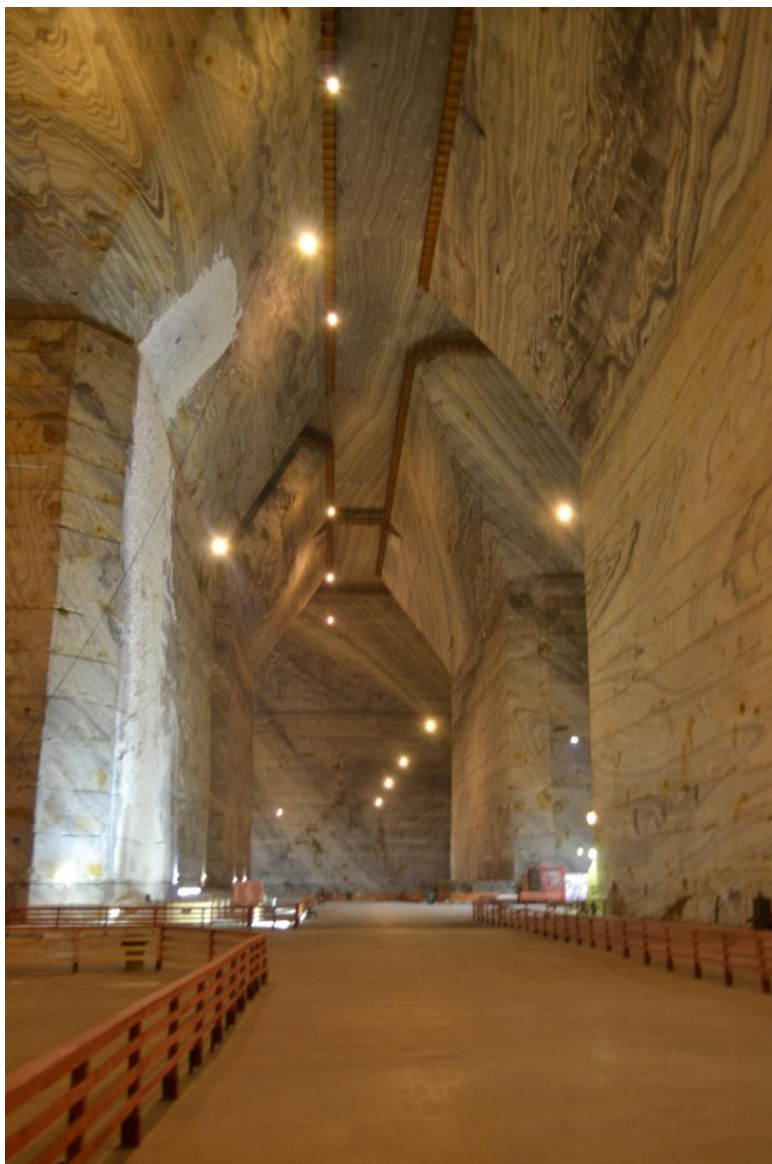


Рисунок 5. Внутри соляной шахты

Калибровка поля излучения стенда по мощности дозы осуществляется методом компаратора с использованием AUTOMESS 6150 AD-6 со сцинтилляционным детектором 6150 AD-b/H, для которого была выполнена калибровка в лаборатории UDO, РТВ в диапазоне 11 – 112 нЗв/ч с использованием источника гамма-излучения ^{137}Cs . При этом расширенная неопределенность ($k=2$) согласно свидетельству о калибровке AUTOMESS 6150 AD-6 не превышает 8,9% для наименьшего значения МАЭД (11 нЗв/ч).

В результате были определены отклики блока-компаратора на гамма-излучение, создаваемое источником с радионуклидом ^{137}Cs и получены калибровочные коэффициенты. Полученные значения калибровочных коэффициентов для МАЭД при измерении гамма-излучения ^{137}Cs для блока-компаратора в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ» и в низкофоновой лаборатории SPLBRL представлены в таблице 1.

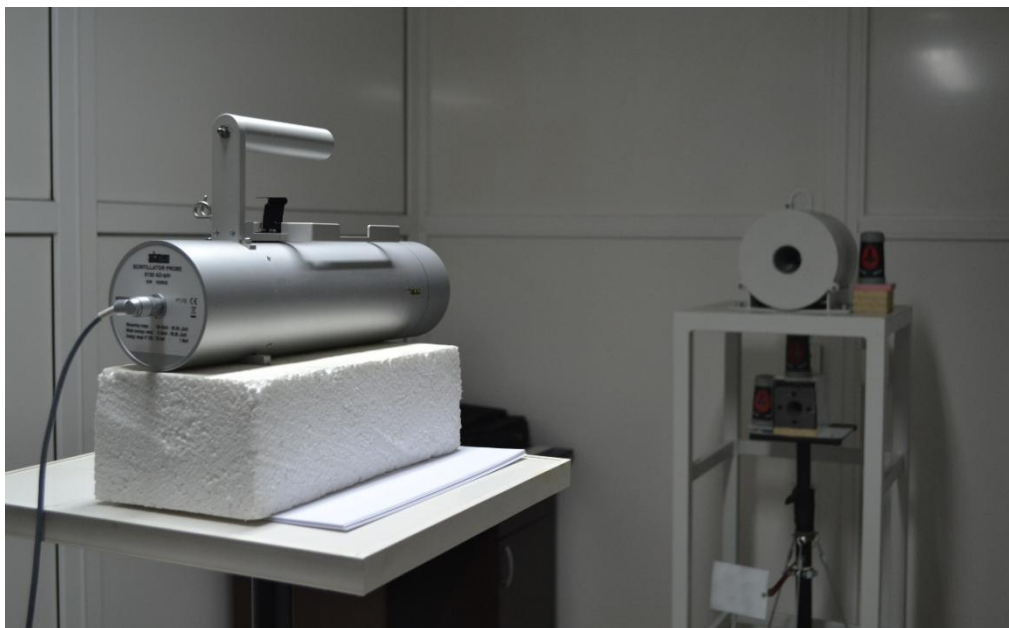


Рисунок 6. Измерение МАЭД на калибровочном стенде с источником гамма-излучения ^{137}Cs с использованием AUTOMESS 6150 AD-6 со сцинтилляционным блоком детектирования 6150 AD-b/Н



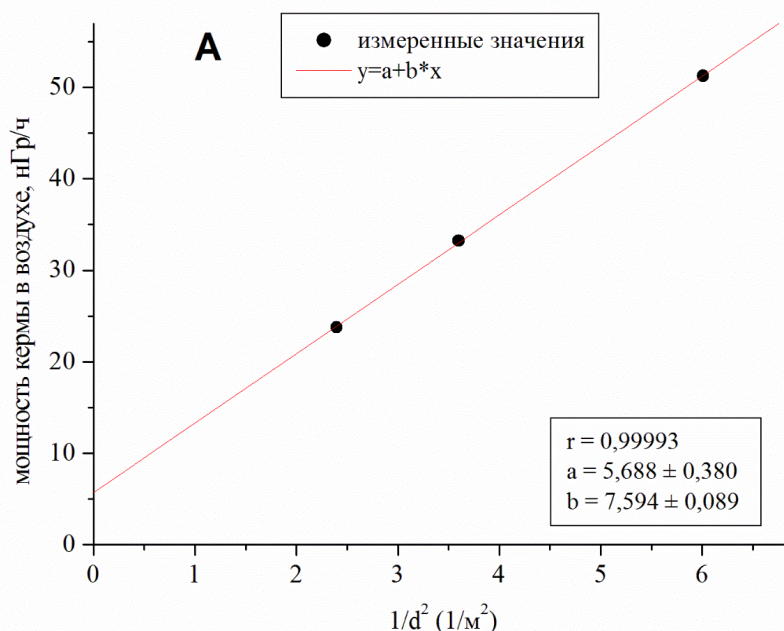
Рисунок 7. Измерение МАЭД на калибровочном стенде с источником гамма-излучения ^{137}Cs с использованием блока-компаратора

Таблица 1 – Калибровочные коэффициенты для блока-компаратора БКМГ-АТ1102 при измерении МАЭД гамма-излучения ^{137}Cs в низкофоновой камере и в низкофоновой лаборатории SPLBRL

Действительное значение МАЭД, нЗв/ч	Калибровочный коэффициент (низкофоновая камера)	Действительное значение МАЭД, нЗв/ч	Калибровочный коэффициент (лаборатория SPLBRL)
33,6	1,073	28,4	1,071
55,4	1,079	47,8	1,072
78,2	1,076	77,2	1,075

Полученные расчетным путем значения радиационного фона близки к измеренным в тех же условиях значениям радиационного фона: $2,047 \pm 0,016$ нГр/ч против $2,52 \pm 0,31$ нГр/ч.

Результаты экстраполяции показаний мощности кермы в воздухе блока-компаратора, создаваемые источником гамма-излучения ^{137}Cs на бесконечное расстояние «источник-детектор» на Заславском водохранилище, в низкофоновой камере и в лаборатории SPLBRL представлены на рисунке 8. Измеренные значения мощности кермы в воздухе и вычисленные с помощью линейной аппроксимации хорошо согласуются между собой, что подтверждается коэффициентом корреляции r более 0,99 (при $P = 0,95$).



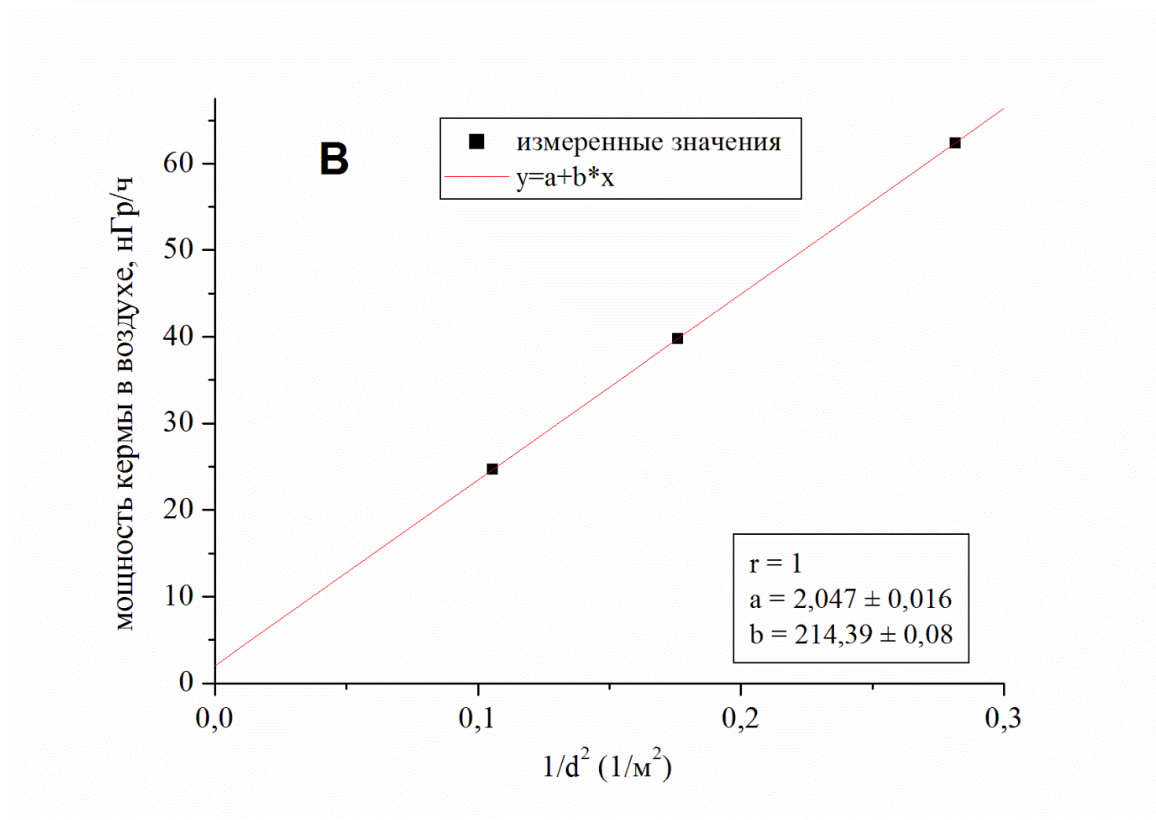
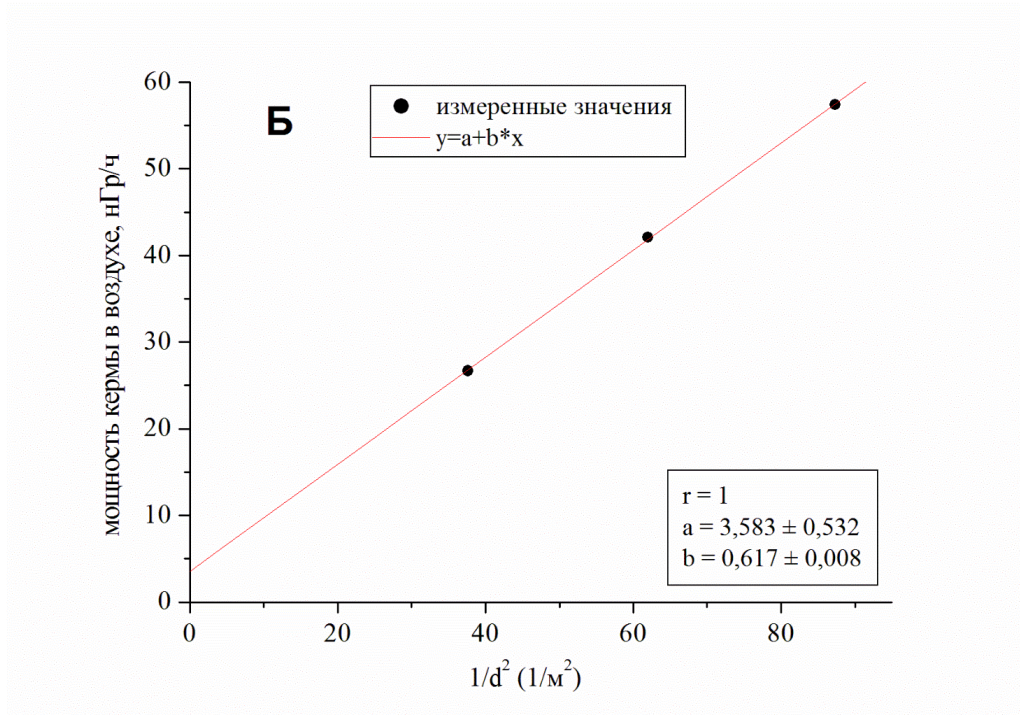


Рисунок 8. Результаты экстраполяции показаний мощности кермы в воздухе, создаваемой источником гамма-излучения ^{137}Cs на бесконечное расстояние «источник-детектор» на Заславском водохранилище (А), в низкофоновой камере (Б) и в лаборатории SPLBRL (В) полученные с использованием блока-компаратора БКМГ-АТ1102

После проведения калибровки было измерено значение собственного фона детектора из состава блока-компаратора в лаборатории за свинцовым защитным экраном без источника излучения. В таком случае влияние излучения естественных радионуклидов окружающей породы и космической составляющей радиационного фона не существенно. После определения значения собственного фона детектора, основной вклад в который дает присутствие ^{40}K в стекле ФЭУ, была рассчитана чувствительность детектора к космической составляющей фонового излучения с учетом результатов измерения радиационного фона на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты расчетов и измерений радиационного фона в различных условиях с целью определения (оценки вклада) компонент радиационного фона для блока-компаратора БКМГ-АТ1102

Значения радиационного фона, полученные путем экстраполяции измерений мощности кермы в воздухе в низкофоновой лаборатории ($1/d^2 \rightarrow 0$), нГр/ч	Измерения радиационного фона			
	в низкофоновой лаборатории (собственный фон детектора и компонента окружающей среды), нГр/ч	в низкофоновой лаборатории за защитой (собственный фон детектора), нГр/ч	на Заславском водохранилище (собственный фон детектора и космическая компонента), нГр/ч	в низкофоновой камере (собственный фон детектора и космическая компонента), нГр/ч
2,05 ± 0,02	2,52 ± 0,12	1,36 ± 0,11	5,15 ± 0,69	3,64 ± 0,35

Полученные данные для определения собственного фона и чувствительности детектора к космической составляющей фонового излучения хорошо согласуются с данными из литературных источников для данного типа детекторов [9] и будут учитываться при проведении низкофоновых измерений.

По результатам калибровки блока-компаратора БКМГ-АТ1102 в низкофоновой лаборатории получены свидетельства о калибровке, данные из которого используются для калибровки полей фотонного излучения по мощности дозы, создаваемых с использованием источника гамма-излучения с радионуклидом ^{137}Cs в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ» для калибровки высокочувствительных дозиметров радиационной защиты по мощности дозы.

Заключение

Апробирован метод калибровки дозиметров радиационной защиты по мощности дозы в низкоинтенсивных полях фотонного излучения для задач радиационного мониторинга согласно рекомендациям международных технических стандартов.

Для решения данной задачи применяется высокочувствительный сцинтилляционный блок-компаратор БКМГ-АТ1102, для которого были определены собственный фон и чувствительность к космической компоненте фонового излучения, а также выполнена калибровка в низкоинтенсивных полях фотонного излучения в лаборатории SPLBRL.

Проведение измерений мощности дозы от источника гамма-излучения ^{137}Cs , и оценка радиационного фона в низкофоновой лаборатории в шахте, на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ», позволяет использовать низкофоновую камеру для калибровки по мощности дозы низкоинтенсивные поля фотонного излучения.

Применение разработанной методики аттестации низкоинтенсивных полей фотонного излучения по мощности дозы методом компаратора, результаты калибровки блока-компаратора в диапазоне 0,03 - 0,1 мкЗв/ч и следование рекомендациям МЭК 61017:2016 и МЭК 60846-1:2009 дают основания для использования блока-компаратора для метрологического обеспечения калибровки высокочувствительных дозиметров в полях низкоинтенсивного фотонного излучения.

Литература

- 1 ГОСТ Р 8.804-2012. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы, амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
- 2 IEC 61017:2016. Radiation protection instrumentation - Transportable, mobile or installed equipment to measure photon radiation for environmental monitoring. – IEC, 2016. – 86 p.
- 3 IEC 60846-1:2009. Radiation protection instrumentation - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors. – IEC, 2009. – 116 p.

- 4 *Фоминых, В.И.* Измерение малых уровней гамма-излучения спектрометрическим методом с использованием оператора «спектр-доза» / В.И. Фоминых, Г.И. Шульгович, В.А. Кожемякин // Метрология. - № 10, 1983 г. – С. 32 - 39
- 5 Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ110 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomtex.com/sites/default/files/udg-at110.pdf>. – Дата доступа: 04.07.2017
- 6 *Лукашевич, Р.В.* Сцинтилляционные блоки-компараторы для измерений мощности кермы в воздухе в диапазоне от 0,03 нГр/с до 50 нГр/с / Р. В. Лукашевич, В. Д. Гузов, В. А. Кожемякин, А. В. Оборин // Метрология и приборостроение. - № 1, 2017. – С. 33 - 37
- 7 *Margineanu, R.* The Slanic-Prahova (ROMANIA) underground low-background radiation laboratory / R. Margineanu, C. Simion, S. Bercea, O.G. Dului, D. Gheorghiu, A. Stochioiu, M. Matei // Applied Radiation and Isotopes. - № 66, 2008. – P. 1501– 1506
- 8 *Dombrowski, H.* Traceability of the PTB low-dose rate photon calibration facility / H. Dombrowski, S. Neumaier // Radiation Protection Dosimetry. - № 140, 2010. – P. 223-233
- 9 *Pensko, J.* Absolute method of the gamma-ray background determination by means of NaI(Tl) scintillation counter / J. Pensko // Nucleonika. - № 12 (4), 1967. – P. 319 - 330

ФОРСАЙТ БУДУЩИХ ПОТРЕБНОСТЕЙ В МЕДИЦИНСКИХ ИЗОТОПАХ

Сухов В.Ю.¹, Кириченко П.Ю.,¹ Марин А.И.¹, Поспелов В.А.²

¹ Военно-Медицинская академия, С.-Петербург,

² ГБ №31, С.-Петербург

soukhov@mail.ru

Тренд

Благодаря захватывающим последним клиническим результатам новых методов лечения и диагностики в ядерной медицине будущий спрос на радиофармацевтические препараты, вероятно, изменится как по количеству, так и по типам изотопов. Таким образом, для разработки методов и обеспечения метрологического, калибровочного и радиометрического сопровождения необходимо знать о текущих и будущих требованиях к изотопу.

Исследования и разработки

За последние несколько лет был проведен ряд исследований, направленных на прогнозирование потенциального рынка перспективных новых медицинских изотопов для лечения рака, контроля боли, брахитерапии, инкапсулированных имплантатов и более точных диагностических применений. Эти исследования не обязательно согласуются друг с другом в отношении потенциального спроса на изотопы для ядерной медицины.

Спектр изотопов

По возможности желательно знать спектр изотопов и определить требуемые количества. Какие конкурирующие диагностические и терапевтические методы повлияют на будущее ядерной медицины? Какие и как внешние соображения, такие как регулирование и утилизация отходов, будут влиять на ядерную медицину? Будут ли эти вопросы влиять на выбор изотопов, которые будут использоваться в ядерной медицине? Будут ли они ограничивать использование ядерной медицины и стимулировать развитие и использование не радиоизотопных технологий?

Триединство задач и решений

На сегодняшний день существует три списка изотопов:

Первый список содержит ^{90}Y , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In , ^{123}I , ^{186}Re . Эти изотопы имеют доказанную клиническую эффективность, а также уже установленную логистику производства и доставки.

Второй список состоит из ^{18}F , ^{32}P , $^{81\text{m}}\text{Kr}$, ^{89}Sr , ^{103}Pd , $^{117\text{m}}\text{Sn}$, ^{127}Xe , ^{125}I , ^{131}I , ^{153}Sm . Эти изотопы уже широко используются, но также постоянно разрабатываются новые методологии их использования.

Третий список – это исследовательские материалы, которые являются многообещающими, как диагностические и терапевтические средства, но только еще изучаются. Список три включает в себя: ^{47}Sc , ^{62}Zn , ^{64}Cu , ^{67}Cu , ^{68}Ge , ^{153}Gd , ^{168}Ho , ^{177}Lu , ^{188}Re , ^{211}At , ^{212}Bi , ^{213}Bi , ^{223}Ra .

1/3 задачи и решения

Первый список (основной): ^{90}Y , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In , ^{123}I , ^{186}Re

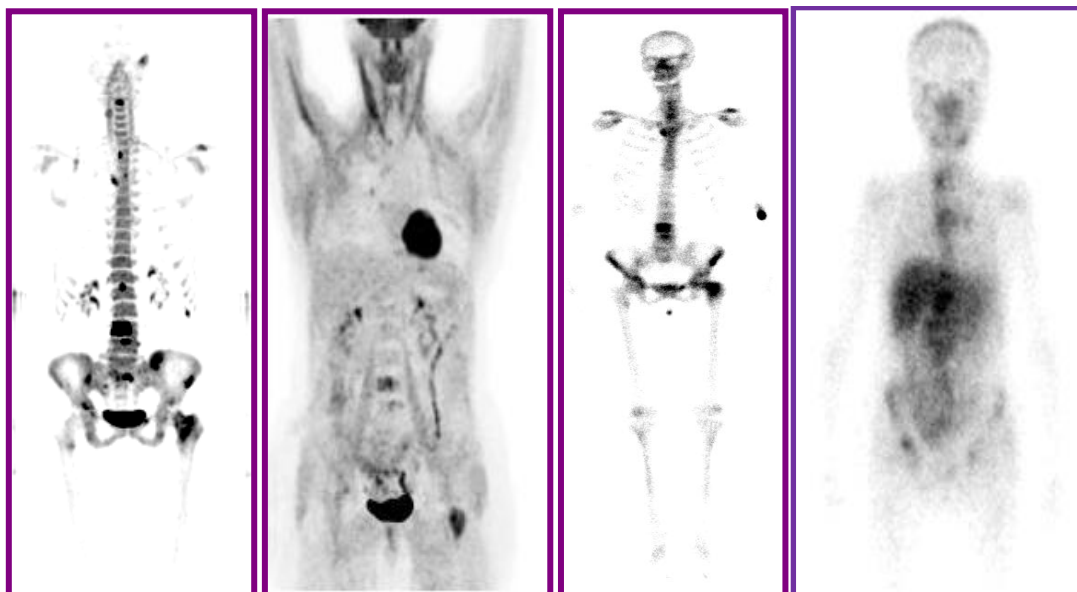


Рисунок 1. Примеры использования радиофармпрепаратов на основе изотопов из 1 списка.

2/3 задачи и решения

Второй список ^{18}F , ^{32}P , $^{81\text{m}}\text{Kr}$, ^{89}Sr , ^{103}Pd , $^{117\text{m}}\text{Sn}$, ^{127}Xe , ^{125}I , ^{131}I , ^{153}Sm .

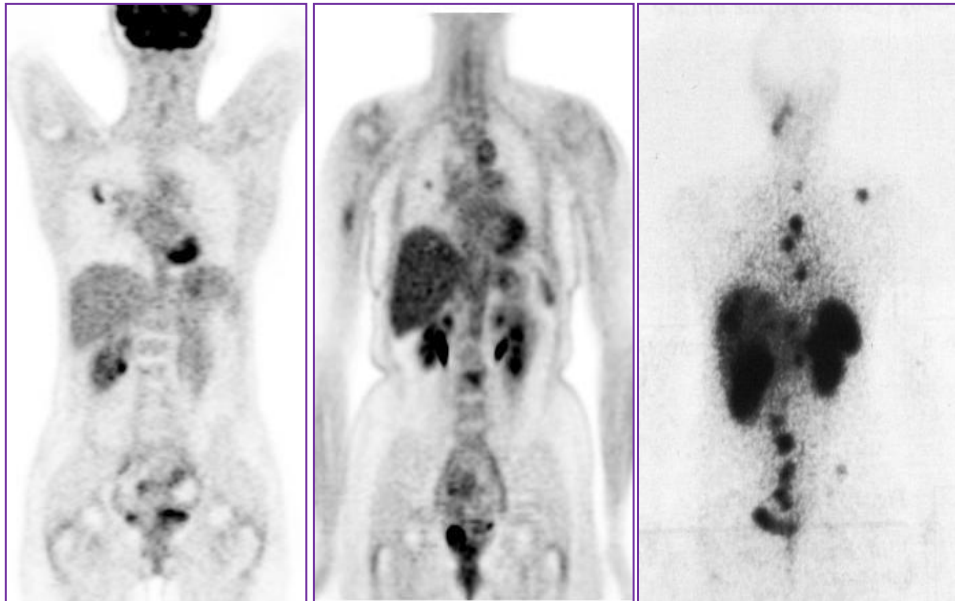


Рисунок 2. Примеры использования радиофармпрепаратов на основе изотопов из 2 списка/

3/3 развитие

Третий список – ^{47}Sc , ^{62}Zn , ^{64}Cu , ^{67}Cu , ^{68}Ge , ^{153}Gd , ^{168}Ho , ^{177}Lu , ^{188}Re , ^{211}At , ^{212}Bi , ^{213}Bi , ^{223}Ra .

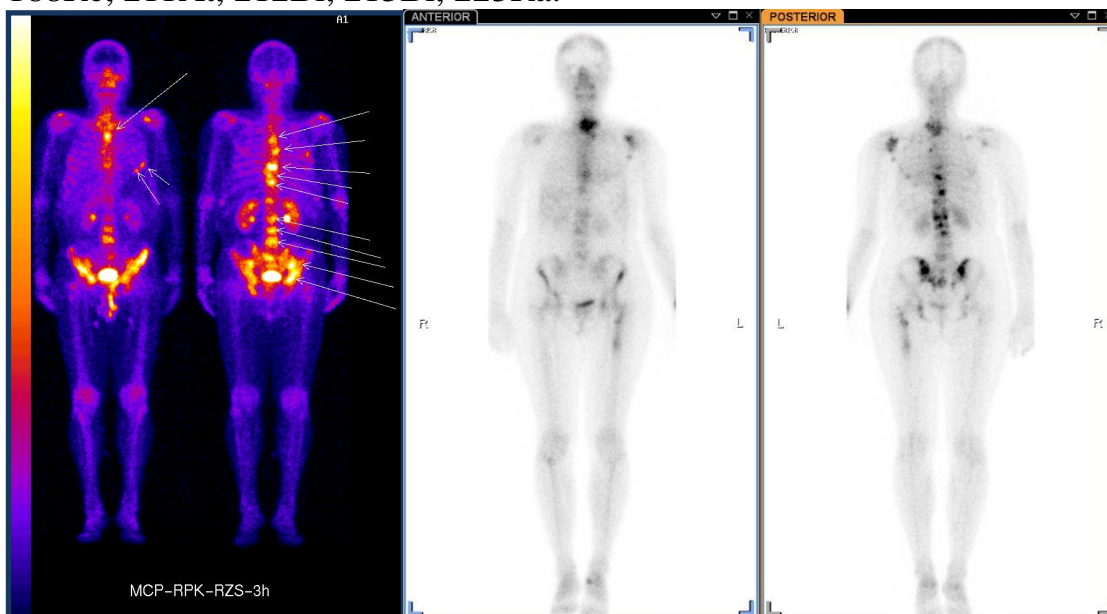


Рисунок 3. Примеры использования радиофармпрепаратов на основе изотопов из 3 списка:

Востребованность

Все эти изотопы имеют конкретные клинические преимущества в следующих основных областях: диагностика кардиологической и сосудистой патологии, дифференциальное выявление инфекционных заболеваний, выявление и дифференциация злокачественных от

доброкачественных заболеваний и дифференциального диагноза различных психических расстройств и др.

Не менее важна возможность разработки лечения рака соединениями для доставки цитотоксических количеств излучения in-situ. Уже получили развитие и получены впечатляющие результаты моноклональных антител и целевых пептидов к рецепторам соматостатина в лечении лимфом и нейроэндокринных опухолей, а также радионуклидная терапия (РНТ), кратковременная лучевая брахитерапия, целенаправленная или таргетная альфа-терапии (ТАТ) и т.п.

Реализация

Исходя из полученной информации о спектрах излучения, физико-химических свойствах изотопов и биологическом поведении меченных ими препаратов, следует использовать весь накопленный опыт, задействовать уже существующий парк дозиметрического оборудования во вновь разработанных методиках, конструировать новые образцы радиометрического оборудования под появляющиеся нужды.

Литература

1. Radioisotopes in Medicine | Nuclear Medicine. / *World Nuclear Association*. N.p., n.d. Web. 23 Mar. 2013. <<http://www.world-nuclear.org/info/Non-Power-Nuclear-Applications/Radioisotopes/Radioisotopes-in-Medicine/#.UU1ok1dWif5>>.
2. Fact Sheet: What is PET?./ *Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging (SNMMI)*. N.p., n.d. Web. 23 Mar. 2013. <<http://interactive.snm.org/index.cfm?PageID=11123>>.
3. Khoo, Anthony. An overview of cobalt radioisotopes in medicine - by Anthony Khoo - Helium./ *Helium - Where Knowledge Rules*. N.p., n.d. Web. 23 Mar. 2013. <<http://www.helium.com/items/871828-an-overview-of-cobalt-radioisotopes-in-medicine>>.
4. Radioisotopes for diagnosis and treatment./ *Lawrence Berkeley National Laboratory*. N.p., 2000. Web. 23 Mar. 2013. <<http://www.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/13/2.html>>.
5. Radioisotopes: What Are They and How Are They Made?./ *The Office of Health, Safety and Security - Home*. N.p., n.d. Web. 23 Mar. 2013. <http://hss.energy.gov/HealthSafety/ohre/roadmap/achre/intro_9_4.html>.
6. What is Nuclear Medicine./ *Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging (SNMMI)*. N.p., n.d. Web. 23 Mar. 2013. <<http://snm.org/index.cfm?PageID=3106>>.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ДОЗИМЕТРИИ В РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЕ

И.Г. Тарутин

*РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова
Минск, Беларусь*

itarutin@tut.by

Введение

Что такое радиационная медицина? Под радиационной медициной понимается та часть медицины вообще, которая использует для диагностики и лечения пациентов радиоактивные вещества и генераторы ионизирующего излучения. Радиационная медицина включает в себя:

- диагностическую радиологию, в том числе интервенционную радиологию;
- ядерную медицину;
- лучевую терапию.

Обязательным компонентом радиационной медицины является определение поглощенных доз, получаемых пациентами, как при диагностическом, так и при терапевтическом облучении. Именно поэтому вся радиационная медицина находится под жестким контролем регулирующих органов, к которым относятся Госстандарт и Госатомнадзор. Именно эти органы выдают радиологическим клиникам лицензии на применение радиоактивных веществ и ионизирующих излучений в диагностике и терапии, требуют применения только зарегистрированных в стране дозиметрических приборов и устройств, а также проведения их регулярной поверки в государственных метрологических лабораториях.

Государственной поверке подлежат любые приборы и устройства, применяемые для измерения поглощенной дозы, мощности поглощенной дозы, распределений дозы и мощности поглощенной дозы в любых облучаемых объектах, в том числе и в пациентах.

В настоящее время в радиационной медицине применяются десятки различных дозиметрических приборов, сотни измерительных детекторов и в диагностике и в лечении. Все они подлежат метрологической аттестации, своевременность и регулярность которой жестко контролируется регулирующими органами.

Где пользователи могут аттестовать все эти приборы и детекторы?

Здесь очень сильно возрастает роль метрологических лабораторий второго разряда, которые должны взять на себя всю эту аттестацию.

Какими образцовыми приборами эти лаборатории должны владеть? Всеми типами приборов, которые они должны поверять.

Понятно, что расширение номенклатуры аттестационных мероприятий потребует существенного возрастания финансовых средств, как у SSDL, так и в радиологических клиниках. Смогут ли они найти деньги на регулярную поверку всего своего парка дозиметрических систем, приборов и устройств?

Как же осуществляется метрологическая аттестация или поверка всего этого оборудования?

Метрологическая служба Российской Федерации имеет две лаборатории, в Санкт-Петербурге и Москве, которые держат государственные эталоны поглощенной дозы, кермы, активности. В международной терминологии они называются лабораториями первого разряда (PSDL). Эти лаборатории передают единицы эталонных величин лабораториям второго разряда (SSDL), которые потом поверяют рабочие приборы и устройства учреждений-пользователей.

В остальных странах СНГ отсутствуют лаборатории первого разряда и работают только лаборатории второго разряда. Такая ситуация существует и в Республике Беларусь. Наша SSDL разделена на две части, одна из которых принадлежит Государственному институту метрологии БелГИМ, а вторая расположена в РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова. Первая занимается поверками дозиметров для радиационной безопасности и защиты, а вторая для поверки дозиметрических приборов, применяемых в радиационной медицине.

Лаборатория метрологии второго разряда, расположенная на территории нашего Центра онкологии, аттестовывает свои образцовые приборы и радионуклидные источники в Российских лабораториях первого разряда. Что же мы получаем оттуда для распространения в Беларуси? Приведем в таблице 1 данные последних аттестаций.

Таблица 1 – Данные 2016-2017 гг. по аттестации белорусских приборов в PSDL

Прибор	Вид излучения	Погрешность (организация)
Унидоз	Рентген 200 кВ	2% (ВНИИМ)
Унидоз	Рентген 60 кВ	2,5% (ВНИИМ)
Диавольт	Маммография	4% (ВНИИМ)
Унидоз	Кобальт-60	2,5% (ВНИИФТРИ)
Калибратор активности	Цезий-137	6% (ВНИИМ)
СИЧ	Цезий-137	5% (ВНИИМ)
Унидоз	КТ	2,5% (ВНИИМ)
Диавольт	Напряжение	4,5% (ВНИИМ)

Анализ полученных данных

Диагностическое облучение

Основным требованием, предъявляемым к радиационной защите людей при их диагностическом облучении, является максимальное уменьшение эффективной дозы, ими получаемой, при сохранении высокого качества получаемой диагностической информации. Понятно, что уменьшение эффективной дозы, зависит от уменьшения поглощенной дозы.

Наиболее точное определение радиационного выхода рентгеновских аппаратов можно осуществить с помощью дозиметров, измеряющих произведение дозы на площадь (ДАП-дозиметров). Поглощенную дозу, получаемую пациентами можно определять по величине дозы на входе в тело с помощью поверенных ионизационных камер. В радиологии давно существует мнение: чем выше доза, тем точнее её надо определять. Поэтому можно согласиться с тем, что при малых дозах, получаемых пациентами от рентгеновских диагностических исследований, погрешность в 2% при калибровке детекторов в эталонной лаборатории первого разряда можно считать допустимой.

В то же время в диагностической радиологии существует проблема аттестации дозиметров, измеряющих произведение дозы на площадь, встроенных в рентгеновские аппараты. Пока в клиниках для записи в амбулаторные карты пациентов вносятся данные со встроенных ДАП-дозиметров с учетом заводских калибровок. Контролирующие органы требуют от клиник метрологической аттестации этих приборов. Следовательно, SSDL должны иметь свои аттестованные переносные ДАП-дозиметры и работать с ними непосредственно в клиниках. Примером таких дозиметров служат дозиметры под общим названием «Диаментор».

Как может поверять такие дозиметры эталонная лаборатория первого разряда? Легко, если она имеет свои эталонные рентгеновские аппараты.

Ещё одна проблема – аттестация детекторов, используемых для контроля качества компьютерных рентгеновских томографов, решена. Имеются камеры для проверки индексов CTDI и DLP, которые спокойно поверяются на всех метрологических уровнях. Погрешность 2 % здесь допустима. А вот приборы для оценки доз, получаемых пациентами на КТ, пока отсутствуют. Дозы рассчитываются в системах обработки данных самих томографов и погрешности получения результатов превышают 15 %.

Ядерная медицина

Основная проблема, существующая в ядерной медицине, заключается в высокой неопределенности аттестации калибраторов активности. Неопределенность калибровки 6 % для эталона второго

разряда слишком велика. Рабочие приборы, калибруемые в SSDL, приводят к еще более высокой неопределенности, что создает у клинических специалистов неуверенность в получаемых пациентами дозах при диагностических исследованиях. И особо волнует врачей такая неопределенность при проведении радионуклидной терапии с помощью жидких радиофармпрепаратов. К примеру, активность вводимого Йода-131 при облучении рака щитовидной железы может достигать 7-8 ГБк. И ошибки в величине вводимой активности при таких измерениях может составлять 700-800 МБк, что в радионуклидной терапии является недопустимым.

Что касается дозиметрических измерений при проведении диагностических исследований на комбинированных эмиссионных томографах в ядерной медицине, то суммарная эффективная доза может достигать по расчетам 40 мЗв и даже выше, причем рентгеновский томограф создает до 2/3 дозы. Не составляют исключения и ПЭТ/КТ томографы. И проблема точности определения дозы на таких аппаратах более важна, чем в рентгеновской диагностике. Нужно отметить, что дозы при радионуклидной диагностике вычисляются методом Монте-Карло при использовании таблиц MIRD-формализма. Сейчас погрешность определения доз этот метод оценивает в 15 %. Поэтому вопросы более точного определения доз в ядерной медицине еще требуют своего решения, в том числе и улучшения метрологического обеспечения.

Лучевая терапия

Современная лучевая терапия в настоящее время интенсивно переходит на облучение пациентов с помощью медицинских линейных ускорителей электронов. Все ускорители являются изоцентрическими, вращаются вокруг стола с пациентами на максимальный угол 360 градусов. В последних моделях ускорителей можно автоматически изменять скорость вращения штативов в процессе облучения пациентов. Размеры полей облучения могут изменяться от 2,5×2,5 мм до 40×40 см. При этом меняется и конфигурация полей облучения. На выходных устройствах аппаратов устанавливаются многолепестковые коллиматоры, позволяющие создавать поля облучения различных размеров и конфигурации, что позволяет существенно уменьшить объемы облучения нормальных тканей, окружающих опухолевые очаги-мишени. Количество лепестков в разных ускорителях варьирует от 80 до 160 пластин (от 40 до 80 пар). Тень от пластин на уровне изоцентра составляет на разных ускорителях от 2,5 мм до 10 мм. Каждая пластина управляется своим двигателем, и конфигурация и размеры полей могут меняться автоматически в зависимости от направления на облучаемый объект.

На штативах ускорителей размещаются рентгеновские излучатели, предназначенные для точного наведения пучков фотонов на облучаемые

мишени. Они же позволяют контролировать с помощью матричных детекторов неподвижность положения пациентов на лечебном столе в процессе облучения. Для верификации условий облучения применяются матричные детекторы, регистрирующие фотонные поля, прошедшие через облучаемые объекты.

Наиболее сложным в лучевой терапии в настоящее время является дозиметрическое обеспечение качественной работы медицинских линейных ускорителей электронов. Общеизвестной международной рекомендацией является максимальная погрешность доставки поглощенной дозы пациентам, не превышающая 5 % [1]. Отсюда возникает необходимость проводить любые измерения поглощенных доз на ускорителях с погрешностью, не превышающей 3 %.

В РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова в 2014–2015 годах разработаны руководства по контролю качества современных линейных ускорителей электронов для проведения высокотехнологичной прецизионной лучевой терапии в медицинских учреждениях, а также по её дозиметрическому сопровождению [2, 3].

Какие дозиметрические измерения нужно проводить на ускорителях электронов?

1. Калибровка мониторных камер в стандартных условиях при использовании всех энергий электронов и фотонов.
2. Измерения радиационного выхода фотонов и электронов различных энергий, различной конфигурации и размеров полей излучения.
3. Измерения поглощенных доз различными матричными детекторами, в том числе для верификации выработанных планов облучения пациентов.
4. In vivo измерения доз, получаемых пациентами.
5. Дозиметрические приборы для проведения быстрых измерений полей фотонов в процессе контроля качества работы ускорителей.

Дозиметры и камеры

Результаты поверок в PSDL дозиметров, применяемых на ускорителях электронов, на пучках Co-60:

- камера Фармера $0,6 \text{ см}^3$. Основная камера для калибровки мониторных камер ускорителей. Погрешность калибровки в PSDL 2,5 %;
- камера Roos плоско-параллельная $0,35 \text{ см}^3$. Применяется для калибровки мониторных камер на пучках электронов. Погрешность 2,5 %;

- камера Markus плоско-параллельная 0,055 см³. Применяется для калибровки мониторных камер на пучках электронов. Погрешность 2,5 %.

Передачу из PSDL в SSDL калибровочных коэффициентов с погрешностью 2 и более процентов следует считать неудовлетворительной. Применение высокотехнологичной лучевой терапии на ускорителях требует снижения указанных величин, по крайней мере, вдвое.

Калибровка мониторных камер в стандартных условиях

Калибровка мониторных камер линейных ускорителей должна проводиться еженедельно, поскольку они имеют особенность плавания характеристик. При этом отклонение величины мониторной единицы от 1 сГр не должно превышать 1 %. Такая калибровка должна проводиться на всех энергиях фотонов и электронов. Калибровки проводятся медицинскими физиками учреждения.

Как в данном случае относиться к требованию инспектирующих организаций о метрологической аттестации мониторных камер? Кто её должен проводить? Какими приборами? На каких фантомах? Сколько раз в году? Один раз в году? Два раза? На фоне регулярных еженедельных измерений цены мониторной единицы физиками учреждения 50 раз в году однократные измерения теряют свою аттестационную направленность и превращаются в проверку квалификации обслуживающего персонала: медицинских физиков и инженеров по обслуживанию. А может быть, нужно проводить сравнительные измерения совместно с пользователями? Возникает вопрос, имеют ли право SSDL проводить такую проверку? Поставленные вопросы требуют обсуждения и выработки соответствующих рекомендаций.

Измерения дозовых характеристик полей облучения фотонов и электронов различных энергий, конфигурации и размеров полей излучения

Как правило, на этапе приемки ускорителя в клиническую эксплуатацию необходимо провести измерения дозовых характеристик полей облучения при разных энергиях, размерах полей и т.д. Измерения проводятся либо в водных, либо в твердотельных фантомах. Детекторы для этих измерений очень редко проходят аттестацию в SSDL, и тем более в PSDL.

Эти детекторы имеют малые полости воздушного объема чувствительной зоны (например, Pin Point), либо не имеют его вовсе (например, алмазные или диодные детекторы). Калибруются все они медицинскими физиками учреждений по своим рабочим дозиметрам, откалиброванным в SSDL. С помощью этих детекторов проводятся

относительные дозиметрические измерения с погрешностями на уровне 1-1.5 %.

Нужно ли эти детекторы и их измерительные системы подвергать метрологической аттестации? Вероятно да. На каких пучках?

Измерения поглощенных доз различными матричными детекторами

Матричные детекторы все интенсивнее внедряются в технологический процесс лучевой терапии на линейных ускорителях. Кроме их применения в порталных и рентгеновских системах, установленных непосредственно на ускорителях, различные матричные системы применяются для верификации рассчитанных планов высокотехнологичного облучения пациентов. Используются верификационные матрицы вместе со специальными фантомами. При этом можно проверять плоскостные и объемные дозовые распределения планов IMRT (радиотерапия с модулированной интенсивностью облучения), VMAT (динамическая терапия с модулированной объемной интенсивностью излучения), 4D – излучение, синхронизированное с дыханием пациента, и др. Вопрос об аттестации таких матричных систем пока остается абсолютно неясным.

Дозиметрические приборы для проведения быстрых измерений полей фотонов в процессе контроля качества работы ускорителей

В контроле качества работы ускорителей применяются дозиметрические матричные устройства с небольшим числом детекторов. Они применяются для быстрой ежедневной проверки геометрических характеристик пучков фотонов и электронов, а также относительного распределения дозы по точкам их расположения. Таким образом, проверяются совпадение световых и радиационных границ полей излучения, а также симметрия в профильных распределениях. Осуществляются эти проверки медицинскими физиками учреждения. Нужна ли этим приборам, общее название которых “Quick Check”, какая-либо метрологическая аттестация?

In vivo измерения доз, получаемых пациентами

In vivo измерения доз, получаемых пациентами, представляют собой прямую верификацию реализации запланированных программ облучения. В некоторых точках тела, как правило, на коже, системами планирования рассчитывается значение поглощенной дозы. Именно в этих точках размещаются детекторы, измеряющие отпущенную дозу. In vivo детекторы могут быть разделены на две категории:

- детекторы, получающие результат в реальном времени;
- детекторы, требующие для получения результатов дополнительной обработки.

К первой категории относятся диодные детекторы, устройства портальной регистрации, полевые транзисторы на МОП-структурах.

Ко второй категории относятся различные люминесцентные детекторы.

Оценка полученных результатов проводится с помощью оценки так называемого гамма-индекса, предусматривающего допуски на отклонение точек размещения детекторов не более 3 мм и отклонение полученной дозы от заданной не более 3%. Отсюда можно сделать вывод о допустимых погрешностях при калибровке *in vivo* детекторов на применяемых в клиниках видах и энергиях излучения.

Ускорители тяжелых заряженных частиц

Представляет также большой интерес аттестация различных дозиметрических систем и устройств, применяемых на ускорителях протонов, а также тяжелых ионов.

Пока калибровки этих систем проводятся на пучках кобальта-60 по методикам, предложенным в Коде практики МАГАТЭ № 398 [4]. Но это касается калибровок мониторных камер, которые там используются. Что касается различных матричных и других устройств, используемых в контроле качества этих ускорителей, то это дело будущего.

Заключение

В настоящее время аттестация клинических дозиметров проводится в PSDL и, соответственно в SSDL, проводится на пучках ^{60}Co . В клиниках их применение на ускорителях осуществляется самими пользователями по методикам, приведенным в [4]. Но в дальнейшем аттестация всех измерительных систем и устройств, применяемых на ускорителях электронов, вероятно, потребует создания эталонных ускорителей в лабораториях первого разряда. Такая работа сейчас проводится в развитых странах мира, и особенно в тех, где дистанционная гамма-терапия уже не применяется.

Здесь возникает целый ряд проблем, связанных с конструкцией выходных устройств ускорителей, созданием эталонных детекторных систем и, главным образом, передачей соответствующих коэффициентов в SSDL, а оттуда в клиники, применяющие ускорители в лучевой терапии. Не исключено, что аттестация дозиметрических систем, встроенных в аппараты, должна будут проводиться специалистами SSDL непосредственно в клиниках на этих установках.

Этот технологический процесс ещё требует своих организационных и методических решений. Но решение этих проблем уже назрело. И, в первую очередь, оно связано с требованиями инспекционных органов, контролирующих качество работы радиотерапевтической техники в клиниках.

Конечно, в наших странах работает ещё много гамма-терапевтических аппаратов для дистанционного облучения, поэтому эталоны кобальта также должны сохраняться, однако, с более высокой точностью измерений, по сравнению с тем, что мы имеем сейчас.

Создание новых эталонов для аттестации увеличившегося парка дозиметрических приборов в медицинских учреждениях потребует значительного увеличения расходов на их приобретение и последующее содержание. Естественно, увеличится стоимость аттестации образцовых приборов для лабораторий второго разряда. Они, в свою очередь, повысят стоимость поверок дозиметрических приборов и устройств, применяемых в клинических учреждениях.

Такая ситуация может вызвать протесты со стороны клиник, особенно, если их возглавляют хирурги или химиотерапевты. Но здесь, в решении этих затруднений, помогут контролирующие органы, которые и являются инициаторами усиления метрологического контроля оборудования для радиационной медицины. Под угрозами лишения лицензий, закрытия эксплуатации аппаратов, клиники будут вынуждены платить за предоставляемые метрологические услуги. В то же время увеличение точности аттестации дозиметрических приборов неминуемо приведет к повышению эффективности лучевого лечения онкологических пациентов.

Литература

1. Determination of Absorbed Dose in a Patient irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures/Report ICRU-24 of Intern. Comiss. on Radiation Units and Measurements. – Bethesda, MD: ICRU, 1976.–76p.
2. Тарутин И.Г. Применение линейных ускорителей электронов в высокотехнологичной лучевой терапии/И.Г. Тарутин, Е.В. Титович//Беларуская навука, Мн. 2014.-173с.
3. Высокотехнологичная лучевая терапия/Сб. нормативных документов. Мн. Беларуская навука, 2016. С.44-142.
4. Определение поглощенной дозы при дистанционной лучевой терапии: международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде/ Серия технических докладов №398. МАГАТЭ, Вена, 2004.

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Генералова В.В., Громов А.А., Гурский М.Н., Жанжора А.П.,
Емельяненко И.А., Тенишев В.П.

ФГУП «ВНИИФТРИ»

tenishev@vniiftri.ru

Единство измерений МПД и ПД интенсивных излучений в радиационных технологиях в России обеспечивается Государственным (Национальным) первичным специальным эталоном единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного (Co^{60} , Cs^{137}), электронного и бета-излучений ($\text{Sr}^{90} + \text{Y}^{90}$) ГЭТ 209-2014 (ФГУП «ВНИИФТРИ»).

Единица МПД (Грей в секунду или Дж/кг сек), воспроизводится калориметрическим методом, основанном на измерении мощности тепловыделения в поглотителе калориметра (с поглотителями из графита или полистирола) в результате поглощения энергии ионизирующего излучения.

Основные характеристики эталона ГЭТ 209-2014

Характеристики	Фотонное излучение	Ускоритель электронов	Бета-излучение
Энергии излучения, МэВ	0,66 – Cs^{137} 1,25 – Co^{60}	от 3 до 10	до 2,3 (макс) $\text{Y-90} + \text{Sr-90}$
Мощности поглощенной дозы, Гр/сек	от 0,3 до 10^3	от 10^2 до $2 \cdot 10^5$	от 0,3 до 10^2
СКО	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
НСП	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Суммарная расширенная неопределенность, $K=2$	$7 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$

Прослеживаемость результатов измерений к национальному эталону обеспечивается пленочными и твердосплавными дозиметрами (стандартные образцы). Разработаны методики калибровки и градуировки этих средств на национальном эталоне ГЭТ 209-2014, методики измерения и передачи единицы ПД интенсивных потоков ионизирующих излучений. Для контроля процесса радиационной обработки изделий разработан химический пленочный цветовой индикатор поглощенной дозы ЦВИД.

Тип дозиметра (стандартного образца)	Сертификат утверждения	Диапазон измерения ПД
СО ПД(Ф)-5/50	СО №1688	5 – 50 кГр
СО ПД(Ф)Р-30/200	СО №1687	30 – 300 кГр
СО ПД(Ф)Р-5/50	СО №1560	5 – 50 кГр
СО ПД(Э)-1/10	СО №3532	1 – 10 кГр
СО ПД(ДТС)-0,05/10	СО №1048	50 Гр – 10 кГр
Цветовой индикатор ПД		1-50 кГр

Пленочные и стеклянные дозиметрические системы (стандартные образцы) ФГУП «ВНИИФТРИ» являются уникальными. В настоящее время эти СО используются для аттестации радиационно-технологических процессов в установках с электронными ускорителями и радионуклидными источниками в соответствии с существующими нормативными требованиями и технологий облучения (ГОСТы, ISO, МИ т.п.) при радиационной обработке медицинской продукции, биодобавок, растительного лекарственного сырья и продуктов питания, радиационной модификации свойств полимеров, исследование изделий электронной техники под воздействием радиационного воздействия и в микробиологии т.п. Диапазон чувствительности и линейные размеры данных СО позволяют их использовать при дозиметрических измерениях, при испытаниях различных объектов на радиационную стойкость, при воздействии специальных факторов.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ЛИТИЕВОГО СТЕКЛА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Масляев П.Ф., Федоров С.Г.

ФГУП «ВНИИФТРИ»

Использование сцинтиллятора на основе литиевых стекол разных диаметров и толщин с набором шаровых замедлителей диаметром от 70 мм до 300 мм для регистрации нейтронного излучения с энергией от 0,4 эВ до 15 МэВ.

Введение

Для большинства изотопов интенсивность нейтронного излучения чрезвычайно низка по сравнению с интенсивностью гамма-излучения. Но есть изотопы, для которых интенсивность нейтронного излучения достаточно высока для образования легко измеримого сигнала.

Существует два основных типа взаимодействия нейтронов с веществом. Во-первых, может иметь место рассеяние нейтрона на ядре с передачей последнему части кинетической энергии, ядро отдачи ионизирует вещество вокруг точки взаимодействия. Данный механизм эффективен лишь при взаимодействии нейтронов с легкими ядрами. Для практического использования в детекторах достаточно легкими являются только ядра водорода и гелия. Во-вторых, нейтрон может вызвать ядерную реакцию. Продукты этих реакций, такие как протоны, альфа-частицы, гамма-кванты и осколки деления, могут регистрироваться детектором. Условием протекания некоторых реакций является наличие минимальной энергии нейтронов (энергетического порога), но ряд реакций могут происходить и на тепловых нейтронах. Детекторы, регистрирующие тепловые нейтроны, как правило, окружены материалом-замедлителем нейтронов, что позволяет добиться достаточной эффективности регистрации нейтронов различной энергии [1].

Сцинтилляторы на основе лития применяются для нейтронной спектрометрии, нейтронной радиографии, в изучении нефтяных скважин, а также при регистрации альфа, бета и гамма излучения в жестких условиях. Однако наиболее широко сцинтилляторы применяются при регистрации нейтронов благодаря обогащению состава литием ${}^6\text{Li}$.

Литий дает многочисленные химические соединения, часть которых используется в детектировании нейтронов. Йодистый литий LiI идет на приготовление монокристаллов для сцинтилляционных счетчиков. Из окиси лития Li_2O изготавливают сцинтиллирующие стекла (литиевые стекла).

Изотоп лития ${}^6\text{Li}$ характеризуется большим сечением (n,α) – реакции на медленных нейтронах. Реакция ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ относится к экзотермическим

реакциям, в которой освобождается около 4,8 МэВ энергии. В результате реакции α -частица и ядро трития разлетаются с кинетическими энергиями $E_\alpha=2,05$ МэВ и $E_\gamma=2,75$ МэВ. Сечение (n, α)-реакции на ${}^6\text{Li}$ для медленных нейтронов описывается законом $1/v$. При энергии нейтронов $E_0 = 0,025$ эВ сечение (n, α)-реакции $\sigma_0= 945$ барн. Сечение (n, α)-реакции природного лития, содержащего 7,5% ${}^6\text{Li}$, составляет всего 71 барн. Поэтому природный литий, как и природный бор, обогащают по изотопу ${}^6\text{Li}$ до 90 %.

В основе воспроизведения единицы мощности эквивалента дозы нейтронного излучения на государственном первичном эталоне единиц мощности поглощенной дозы и мощности эквивалента дозы нейтронного излучения ГЭТ 117-2010 лежит метод с использованием измерителя мощности эквивалента дозы с набором шаровых замедлителей. В основу метода положен блок детектирования со сменными шаровыми замедлителями различных диаметров и блок обработки сигнала. Блок детектирования состоит из сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов ${}^6\text{LiI}$ (Рисунок 1). Диаметр сцинтиллятора 8 мм, высота 8 мм. Блок обработки сигнала включает в себя высоковольтный источник напряжения, АЦП работающий под управлением программы «ball».



Рисунок 1. Блок детектирования из состава ГЭТ 117-2010.

Эксперимент

В качестве аналога для воспроизведения единицы мощности эквивалента дозы нейтронного излучения было рассмотрено использование блока детектирования с использованием литиевых стекол. В таблице 1 представлено сравнение основных характеристик двух видов сцинтилляторов.

Таблица 1 – Основные характеристики сцинтилляторов на основе лития.

Характеристика	Йодистый литий LiI(Eu)	Окиси лития Li ₂ O
Обогащение ⁶ Li, %	Не более 90	95
Плотность, г/см ³	4,06	2,42
Световой выход, %	~15	20
Гигроскопичность	Да	Нет

Принципиальная схема измерительного устройства представлена на рисунке 2.

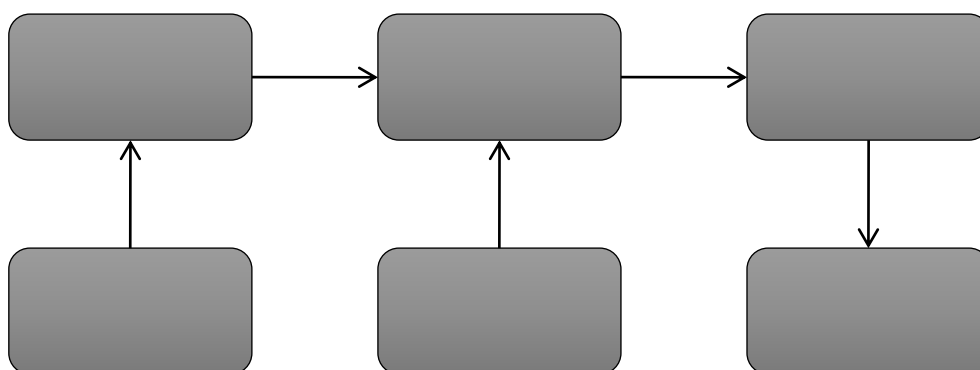


Рисунок 2. Принципиальная схема измерительного устройства.

Световые вспышки регистрируются с помощью фотоумножителя, который соединен со сцинтиллятором посредством световода из оргстекла. Импульсы с фото-умножителя блока детектирования через усилитель поступают на аналогово-амплитудный преобразователь (амплитудный анализатор). Измеритель работает в автоматическом режиме под управлением программы «ball». Измерения проводятся в коллимированном пучке нейтронного излучения последовательно с каждым шаровым замедлителем.

Нормированные аппаратурные спектры, полученные для разных сцинтилляционных детекторов и размеров шаров, показаны на рисунках 3-4.

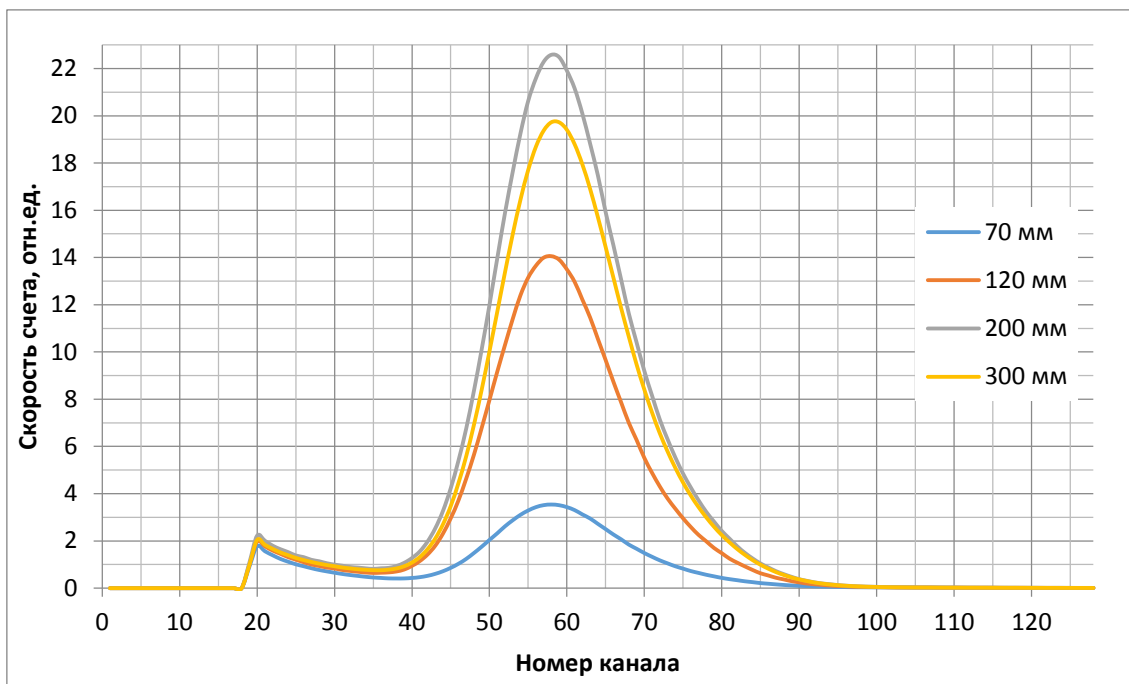


Рисунок 3. Отклик сцинтилляционного детектора из литиевого стекла при использовании шаровых замедлителей различного диаметра.

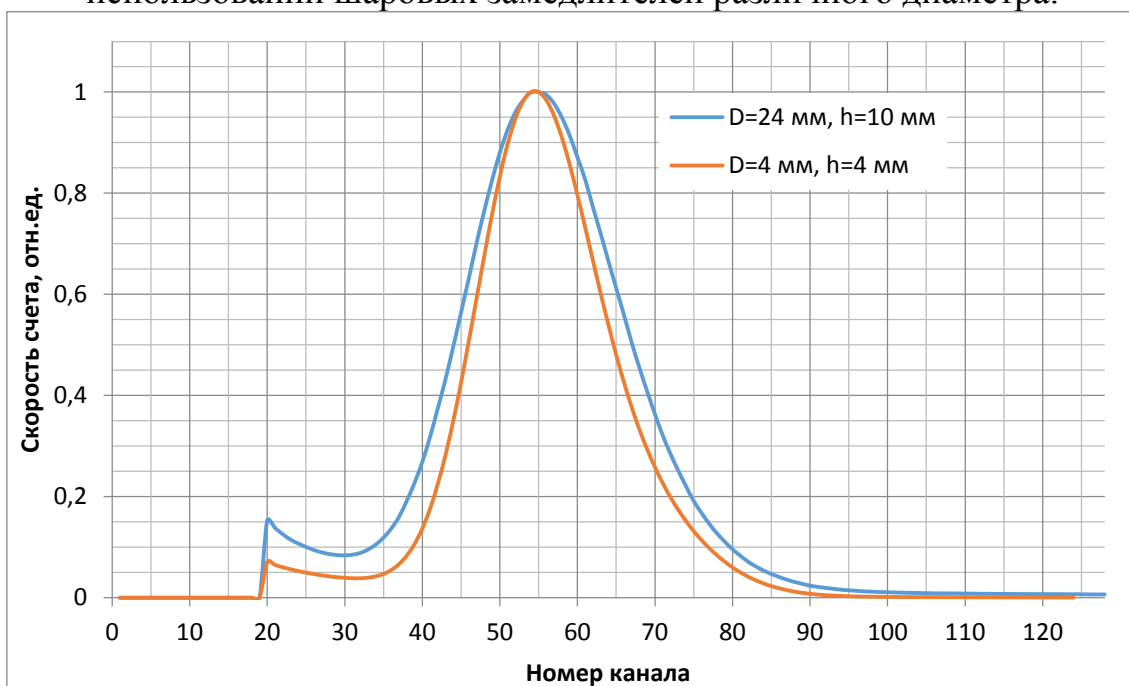


Рисунок 4. Сравнение нормированных аппаратурных спектров от сцинтилляционных детекторов из литиевых стекол разного размера, размещенных в шаровом замедлителе диаметром 300 мм.

Сравнение рисунков 5 и 6 показывает преимущество использования литиевых стекол перед сцинтиллятором из йодистой литий. На рисунке 6 помимо основного пика от тепловых нейтронов соответствующего энергии 4,8 МэВ, присутствует пик от гамма-излучения с энергией 4,4 МэВ

плутоний-бериллиевого нейтронного источника из-за наличия тяжелого изотопа йода, что приводит к дополнительной погрешности, связанной с наличием существенного взаимодействия с гамма-излучением. Также чувствительность к гамма-излучению кристалла ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ будет зависеть от его размеров и ограничивает его использование.

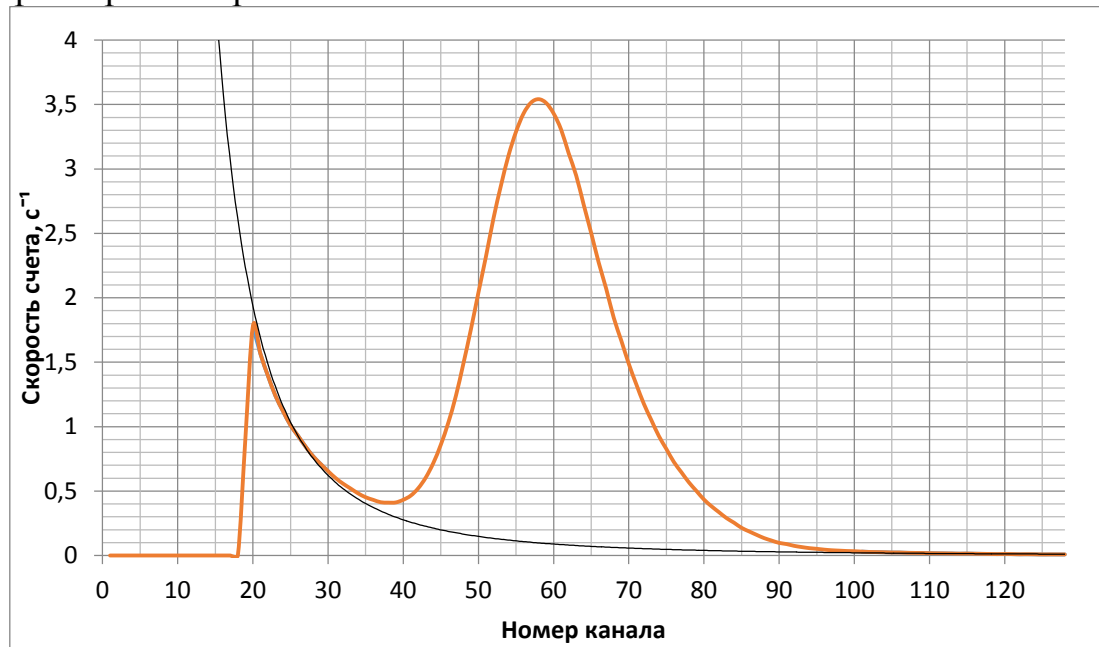


Рисунок 5. Аппаратурный спектр сцинтиляционного детектора из семи литиевых стёкол размещенных в шаровом замедлителе диаметром 70 мм на расстоянии 1 м от PuBe источника, размер стекла: диаметр 4 мм, высота 4 мм. Черная кривая показывает вклад гамма-излучения.

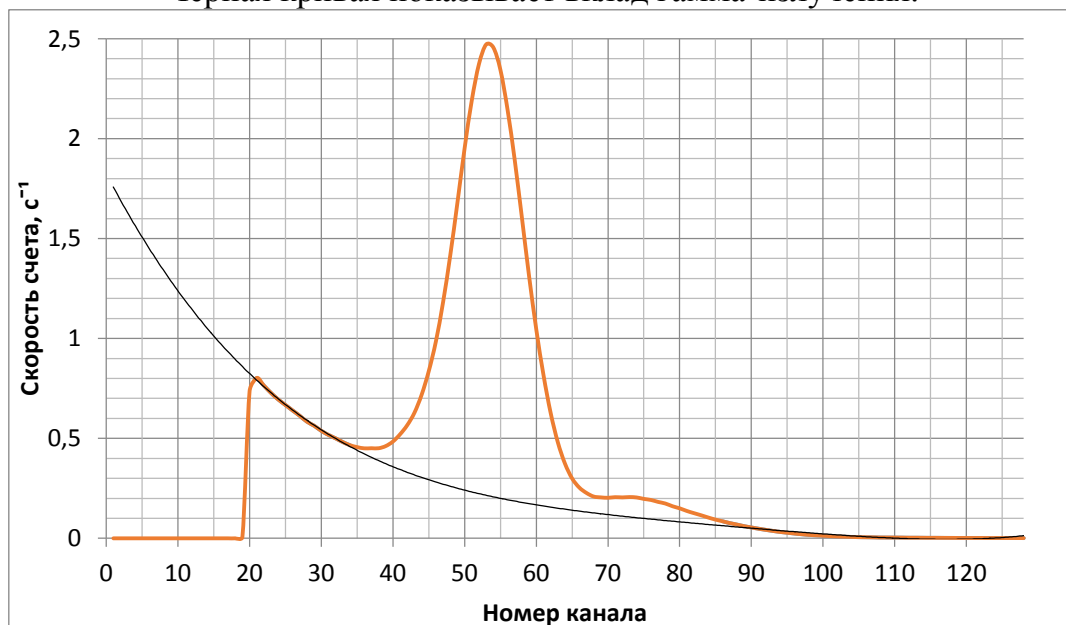


Рисунок 6. Аппаратурный спектр сцинтиляционного детектора ${}^6\text{LiI}$ размещенного в шаровом замедлителе 70 мм на расстоянии 1 м от PuBe источника, размер детектора: диаметр 8 мм, высота 8 мм. Черная кривая показывает вклад гамма-излучения.

В таблице 2 приведены экспериментальные значения полных откликов сцинтилляционных детекторов ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ и литиевых стёкол (${}^6\text{Li}_2\text{O}$) с шаровыми замедлителями различных диаметров в поле плутоний-бериллиевого нейтронного источника.

Таблица 2 – Полный отклик детекторов в зависимости от типа и размера детекторов

Тип и размер детектора	Полный отклик детекторов (с^{-1}) в зависимости от диаметра шарового замедлителя и типа детектора			
	70 мм	120 мм	200 мм	300 мм
${}^6\text{LiI}$, D=8 мм, h=8 мм	49,24	137,40	214,73	181,05
${}^6\text{Li}_2\text{O}$, D=4 мм, h=4 мм	96,28	315,86	494,66	436,00
${}^6\text{Li}_2\text{O}$, D=24 мм, h=10 мм	421,03	1052,54	1600,32	1386,72

В таблице 3 приведены экспериментальные значения откликов сцинтилляционных детекторов ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ и литиевых стёкол (${}^6\text{Li}_2\text{O}$) от тепловых нейтронов с шаровыми замедлителями различных диаметров в поле плутоний-бериллиевого нейтронного источника. Сравнивая между собой сцинтилляционные детекторы видно, что детекторы на основе литиевых стёкол имеют большую чувствительность к тепловым нейтронам даже при меньшем размере, а также существенно меньшую чувствительность к гамма-излучению.

Таблица 3 – Отклик детекторов от тепловых нейтронов в зависимости от типа и размера детекторов

Тип и размер детектора	Отклик детекторов от тепловых нейтронов (с^{-1}) в зависимости от диаметра шарового замедлителя			
	70 мм	120 мм	200 мм	300 мм
${}^6\text{LiI}$, D=8 мм, h=8 мм	24,45	100,95	166,70	137,60
${}^6\text{Li}_2\text{O}$, D=4 мм, h=4 мм	71,44	284,28	462,59	394,46
${}^6\text{Li}_2\text{O}$, D=24 мм, h=10 мм	275,46	894,45	1421,78	1208,15

В таблице 4 приведены коэффициенты, показывающие отношение отклика от тепловых нейтронов к полному отклику в зависимости от диаметра шарового замедлителя.

Таблица 4 – Коэффициент отношения отклика от тепловых нейтронов к полному отклику в зависимости от типа и размера детекторов

Тип и размер детектора	Коэффициент отношения отклика от тепловых нейтронов к полному отклику в зависимости от диаметра шарового замедлителя			
	70 мм	120 мм	200 мм	300 мм
${}^6\text{LiI}$, D=8 мм, h=8 мм	0,49	0,73	0,77	0,76
${}^6\text{Li}_2\text{O}$, D=4 мм, h=4 мм	0,74	0,90	0,93	0,90
${}^6\text{Li}_2\text{O}$, D=24 мм, h=10 мм	0,65	0,85	0,89	0,87

Выводы

Рассмотренный в качестве аналога для воспроизведения единицы мощности эквивалента дозы нейтронного излучения блок детектирования с использованием литиевых стекол является хорошей заменой сцинтиллятора ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$. Стекло обладает большей чувствительностью к тепловым нейтронам. Использование литиевых стёкол не накладывает ограничений на размер детектора, так как практически не чувствительно к гамма-излучению и не содержит примеси тяжелых изотопов йода и других нуклидов, влияющих на дополнительную погрешность при обработке пика от тепловых нейтронов. Эффективность снимаемого сигнала при использовании шарового замедлителя диаметром 70 мм увеличивается в 1,49 и 1,32 раза для литиевых стёкол размером $D=4$ мм, $h=4$ мм и $D=24$ мм, $h=10$ мм соответственно. Эффективность снимаемого сигнала при использовании шарового замедлителя диаметром 120, 200, 300 мм увеличивается в 1,20 и 1,15 раза для литиевых стёкол размером $D=4$ мм, $h=4$ мм и $D=24$ мм, $h=10$ мм соответственно.

Литература

- 1 Детекторы нейтронов. Т.В. Детекторы нейтронов. Т.В. Крейн, М.П. Бейкер, глава 13, стр. 377