

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 53.089.68

ЛУКАШЕВИЧ

Роман Васильевич

**ДОЗИМЕТРИЯ ПОЛЕЙ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ
НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ И ОКОЛОФОНОВЫХ УРОВНЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.11.10 – Приборы и методы для измерения ионизирующих
излучений и рентгеновские приборы

Минск, 2022

Научная работа выполнена в учреждении образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» БГУ и Научно-производственном унитарном предприятии «АТОМТЕХ» ОАО «МНИПИ».

Научный руководитель –

Чудаков Владимир Андреанович

кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Тарутин Игорь Германович,

доктор технических наук, профессор,

медицинский физик отдела

инженерного обеспечения лучевой терапии

ГУ «Республиканский научно-практический

центр онкологии и медицинской

радиологии им. Н.Н. Александрова»;

Жукова Ольга Митрофановна,

кандидат технических наук, доцент,

старший научный сотрудник

лаборатории радиационной безопасности

РУП «Научно-практический центр гигиены».

Оппонирующая организация – ГНУ «Объединенный институт

энергетических и ядерных исследований –

СОСНЫ» Национальной академии наук

Беларуси.

Защита состоится 9 сентября 2022 года в 10.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.10 при Белорусском государственном университете по адресу: Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407. Телефон ученого секретаря 209-57-09, e-mail: raman.lukashevich@gmail.com.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «15» июля 2022 года.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций
кандидат технических наук



А.Ф. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Метрологическое обеспечение измерений рентгеновского и гамма-излучения базируется на использовании ионизационного метода. Данный метод обладает неоспоримыми преимуществами, такими как воспроизводимость, линейность и относительно постоянное значение отклика в широком диапазоне энергий рентгеновского и гамма-излучения. Вместе с тем нижняя граница диапазона измерений для ионизационных камер, входящих в состав первичных эталонов, соответствует уровню мощности кермы в воздухе порядка 20 мкГр/ч. Для воспроизведения уровней излучения меньших значений (<20 мкЗв/ч для эквивалента дозы) на поверочных дозиметрических установках обычно используют закон обратных квадратов расстояний. Данному подходу присущи недостатки, связанные с влиянием внешнего радиационного фона, геометрией поля рентгеновского и гамма-излучения, расчетами при использовании корректирующих констант. Вместо закона обратных квадратов следует использовать измеренные опорные значения дозиметрических величин на определенных расстояниях источник-детектор. Применение высокочувствительных дозиметрических средств измерений в качестве рабочих эталонов или блоков-компараторов в составе поверочных дозиметрических установок позволит расширить нижнюю границу диапазона измерений мощности дозы до 0,1 мкГр/ч (мкЗв/ч) методом прямых измерений.

Другой важной задачей является измерение мощности дозы на уровне естественного радиационного фона при проведении радиационного мониторинга. При этом важно получать информацию о незначительных вариациях техногенного радиационного фона по отношению к естественному. Для этого необходимо использовать средства измерений, обладающие высокой чувствительностью, низким уровнем собственного фона и высокой временной стабильностью. В этом случае важной проблемой, которую необходимо решить при калибровке дозиметрических средств измерений, является обеспечение нижней границы измерительного диапазона на уровне радиационного фона окружающей среды. Согласно последним рекомендациям Международной электротехнической комиссии (IEC) и техническим требованиям для АСКРО атомных станций, нижняя граница диапазона измерений мощности дозы приборов радиационной защиты при контроле радиационной обстановки в окружающей среде должна быть на уровне 0,03 – 0,05 мкЗв/ч (мкГр/ч). Использование высокочувствительных дозиметрических устройств на базе сцинтилляционных блоков детектирования становится возможным для измерения мощности дозы ниже 0,1 мкЗв/ч (мкГр/ч), при этом способность

подобных устройств измерять мощность дозы ниже 0,1 мкЗв/ч (мкГр/ч) должна подтверждаться специальными исследованиями.

Для создания эталонных полей гамма-излучения околофоновых уровней необходимо метрологически обеспечить значения мощности дозы на уровне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч (мкГр/ч), т.е. создать эталонные околофоновые поля гамма-излучения при минимальном влиянии естественного радиационного фона с использованием эталонного средства измерений. Для этого необходимо использовать высокочувствительные средства измерений и обеспечить их калибровку в аналогичных эталонных полях гамма-излучения с мощностью дозы 0,03 – 0,1 мкЗв/ч (мкГр/ч).

Решение задач метрологического обеспечения полей рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных и околофоновых уровней по мощности дозы с использованием сцинтилляционных детекторов нетривиально ввиду сложной зависимости эффективности регистрации гамма-квантов от их энергии. В этой связи исследования, направленные на разработку высокочувствительных эталонных дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования, преследуют решение актуальной научно-практической задачи, имеющей важное значение для метрологического обеспечения дозиметрии высокочувствительных дозиметрических средств измерений в полях рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных (0,1 мкЗв/ч (мкГр/ч) – 1 мЗв/ч (мГр/ч)) и околофоновых (0,03 – 0,1 мкЗв/ч (мкГр/ч)) уровней по мощности дозы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Работа выполнялась в рамках ряда опытно-конструкторских работ в области ядерно-физических измерений, инициативно выполненных предприятием «АТОМТЕХ» за счет собственных средств и направленных на создание и серийный выпуск конкурентоспособной продукции: ОКР №204021 «Спектрометрический блок-компаратор для аттестации дозового поля от источников рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий от 5 до 250 кэВ», НИОКР №204022 «Блоки-компараторы мягкого рентгеновского и гамма-излучения для метрологической аттестации поля излучения по мощности дозы», ОКР №204050 «Разработать и изготовить блок-компаратор гамма-излучения для метрологической аттестации поля излучения по мощности дозы БКМГ-АТ1106», ОКР №204079 «Модернизация низкофоновой камеры»,

ОКР №204091 «Разработать низкофоновою дозиметрическую установку гамма-излучения» (Лукашевич Р.В. – главный конструктор ОКР и НИОКР).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является метрологическое обеспечение дозиметрии полей рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных и околофоновых уровней (0,03 – 1000 мкГр/ч (мкЗв/ч)) с использованием разработанных блоков-компараторов рентгеновского и гамма-излучения на основе NaI(Tl) сцинтилляционных блоков детектирования.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- адаптировать метод расчета функции радиационного отклика для создания высокоточных дозиметрических средств измерений;
- разработать технические задания на проектирование и изготовление сцинтилляционных блоков детектирования рентгеновского и гамма-излучения для создания на их базе блоков-компараторов, разработать физические модели блоков детектирования для расчета аппаратурных спектров и других характеристик методом Монте-Карло;
- выполнить расчеты функций радиационного отклика с использованием адаптированного метода для разрабатываемых блоков-компараторов на основе модельных аппаратурных спектров, полученных методом Монте-Карло, и с использованием экспериментальных измерений аппаратурных спектров;
- исследовать основные метрологические характеристики и выполнить калибровку разработанных блоков-компараторов в эталонных полях рентгеновского и гамма-излучения по мощности дозы в диапазоне 0,1 мкЗв/ч (мкГр/ч) – 1 мЗв/ч (мГр/ч);
- выполнить калибровку блоков-компараторов в эталонных полях гамма-излучения по мощности дозы в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч согласно рекомендациям международных стандартов;
- разработать и апробировать методику определения дозиметрических характеристик полей гамма-излучения околофонового уровня по мощности дозы в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч с использованием разработанных блоков-компараторов в низкофоновой камере;
- внедрить результаты исследования на предприятии «АТОМТЕХ» для дозиметрии полей рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных и околофоновых уровней в диапазоне 0,03 – 1000 мкЗв/ч для обеспечения выпуска широкой линейки высокочувствительной дозиметрической аппаратуры.

Объектом исследования в диссертационной работе являются поля рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных и околофоновых уровней.

Предметом исследования в диссертационной работе являются методы определения дозиметрических характеристик полей рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных и околофоновых уровней по мощности дозы в диапазоне 0,03 – 1000 мкЗв/ч с использованием блоков-компараторов.

Научная новизна

1. Адаптированный метод расчета функции радиационного отклика, позволяющий минимизировать энергетическую зависимость чувствительности и нелинейность дозовой характеристики дозиметрических средств измерений на основе NaI(Tl) сцинтилляционных блоков детектирования.

2. Разработана методика калибровки дозиметров в полях гамма-излучения околофоновых уровней в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч в условиях минимального влияния естественного радиационного фона в низкофоновой камере с использованием блоков-компараторов гамма-излучения.

3. Обосновано применение экстраполяционного и компенсационного методов калибровки дозиметрических средств измерений в полях гамма-излучения околофоновых уровней (0,03 – 0,1 мкЗв/ч) в условиях минимального влияния естественного радиационного фона.

4. Рассчитаны функциональные зависимости положения эффективного центра энерговыделения NaI(Tl) детекторов $\varnothing 40 \times 40$ мм и $\varnothing 25 \times 40$ мм от геометрии измерения и расстояния до точечных источников гамма-излучения с радионуклидами ^{241}Am и ^{137}Cs в условиях малых расстояний (10 – 100 см) «источник-детектор» для ряда измерительных задач.

Положения, выносимые на защиту

1. Адаптированный метод расчета функций радиационного отклика, преимущество которого состоит в минимизации энергетической зависимости чувствительности и нелинейности дозовой характеристики дозиметрических средств измерений на основе NaI(Tl) детекторов за счет использования полиномиальной интерполяции, оптимизации энергетических интервалов, применении экспериментальных и теоретических аппаратных спектров.

2. Блоки-компараторы рентгеновского и гамма-излучения на базе NaI(Tl) сцинтилляционных блоков детектирования для определения дозиметрических характеристик полей рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных уровней по мощности кермы в воздухе в диапазоне 0,1 – 1000 мкГр/ч с нелинейностью дозовой характеристики не более $\pm 3\%$ и энергетической

зависимостью чувствительности в пределах $\pm 5\%$ в диапазоне энергий 20 кэВ – 1,5 МэВ ($\pm 15\%$ в диапазоне энергий 5 – 17 кэВ).

3. Методика калибровки дозиметров в полях гамма-излучения околофоновых уровней в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч с использованием разработанных блоков-компараторов гамма-излучения при минимальном влиянии естественного радиационного фона. Впервые методически и практически реализована возможность калибровки по мощности дозы или исследования дозовой характеристики средств измерений в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч в низкофоновой камере.

4. Получены функциональные зависимости положения эффективного центра энергосвечения NaI(Tl) детекторов $\varnothing 40 \times 40$ мм и $\varnothing 25 \times 40$ мм от расстояния до точечных источников гамма-излучения с радионуклидами ^{241}Am и ^{137}Cs в условиях малых расстояний (10 – 100 см) «источник-детектор» для ряда измерительных задач, в том числе при работе в низкофоновой камере.

Личный вклад соискателя ученой степени

Представленные в диссертационной работе научные результаты, а также положения, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно.

Автор исследовал и адаптировал метод расчета функций радиационного отклика для создания высокочувствительных высокоточных дозиметрических средств измерений с использованием спектрометрического метода дозиметрии.

Автор выполнил расчеты функций радиационного отклика для разрабатываемых дозиметрических средств измерений на основе модельных аппаратных спектров, полученных методом Монте-Карло, и с использованием экспериментально измеренных аппаратных спектров.

Автор разработал, апробировал и внедрил методику калибровки дозиметров в полях гамма-излучения околофоновых уровней в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч с использованием блоков-компараторов гамма-излучения при минимальном влиянии естественного радиационного фона.

Автор самостоятельно получил функциональные зависимости положения эффективного центра энергосвечения NaI(Tl) детекторов $\varnothing 40 \times 40$ мм и $\varnothing 25 \times 40$ мм от расстояния до точечных источников гамма-излучения с радионуклидами ^{241}Am и ^{137}Cs в условиях малых расстояний (10 – 100 см) «источник-детектор» на основе модельных данных.

Автор внедрил результаты исследования на предприятии «АТОМТЕХ» для дозиметрии полей рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных и околофоновых уровней в диапазоне 0,03 – 1000 мкЗв/ч (мкГр/ч) для обеспечения выпуска высокочувствительной дозиметрической аппаратуры.

Соискатель лично принимал участие в создании высокочувствительных дозиметрических средств измерений (разработка ТЗ, подготовка физических моделей для расчета аппаратурных спектров, калибровка энергетической шкалы), исследованиях основных метрологических характеристик и калибровке в эталонных полях рентгеновского и гамма-излучения по мощности дозы на эталонах Российской Федерации и Румынии, внедрении результатов исследования на предприятии. Блоки детектирования (измерительные каналы) из состава блоков-компараторов и ПО «CompaS» были созданы на предприятии «АТОМТЕХ» по техническим заданиям автора.

Диссертантом подготовлены и оформлены материалы для научных публикаций. В совместной работе с соавторами:

- совместно с Г.А. Фоковым («АТОМТЕХ») выполнено численное моделирование аппаратурных функций отклика и положений эффективного центра энерговыделения блоков детектирования с использованием программного комплекса SNEGMONT,

- совместно с В.Д. Гузовым и В.А. Кожемякиным («АТОМТЕХ») выполнено обсуждение и верификация методов исследования, интерпретация полученных результатов исследования,

- совместно с А.В. Обориным (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева») выполнены калибровки разработанных дозиметрических средств измерений на эталонах Российской Федерации,

- совместно с Ю.А. Верхушей, А.В. Новиченко, К.Г. Сеньковским проведена апробация результатов исследования на предприятии «АТОМТЕХ».

Автор признателен соавторам: директору УП «АТОМТЕХ» канд. техн. наук ст.н.с. В.А. Кожемякину, сотрудникам УП «АТОМТЕХ»: Г.А. Фокову, В.Д. Гузову, Ю.А. Верхуше, А.В. Новиченко, К.Г. Сеньковскому и А.В. Оборину (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»).

В диссертационную работу не включены результаты, которые были получены другими соавторами или с другими соавторами. Материалы совместных публикаций использованы соискателем в объеме авторского вклада.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Материалы диссертационной работы были представлены на: 11-м, 12-м, 13-м, 14-м, 15-м Международных совещаниях «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии» ППСР-2009, 2011, 2015, 2017, 2019 (п. Агой Краснодарского края Российской Федерации, 20-25 сентября 2009 г.; Санкт-Петербург, 10-14 сентября 2011 г.; 05-08 октября 2015 г.; Москва, 04-06 октября 2017 г.; Казань, 07-11 октября 2019 г.); 2-й, 4-й, 5-й, 6-й

Международных конференциях «Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии» ИСМАРТ-2010, 2014, 2016, 2018 (Харьков, 14-19 ноября 2010 г.; Минск, 12-16 октября 2014 г.; 26-30 сентября 2016 г.; 09-12 октября 2018 г.); 11-й Международной научной конференции «Сахаровские чтения 2011» (Минск, 19-20 мая 2011 г.); 18-м Международном семинаре «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ» (Обнинск, 14-18 ноября 2011 г.); 64-й Международной конференции «ЯДРО-2014» (Минск, 01-04 июля 2014 г.); 7-й научно-практической конференции «Обеспечение единства измерений в области использования атомной энергии» (Сочи, 03-07 октября 2016 г.); Международной научно-технической конференции «Метрология-2017» (Минск, 04-05 апреля 2017 г.); Международной конференции «175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений» (Санкт-Петербург, 14-15 июня 2017 г.); Международный научный форум «Ядерная наука и технологии» (Алматы, 12-15 сентября 2017 г.); Научно-технической конференции «Ядерное приборостроение. Актуальные вопросы разработки, производства, эксплуатации. Метрология ионизирующих излучений» (Сочи, 21-24 октября 2019 г.); II Международная научно-техническая конференция «Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС» (Минск, 27-28 апреля 2021 г.); XXVII Международный семинар «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных» (Обнинск, 15-19 ноября 2021).

Результаты работы апробированы при исследованиях энергетической зависимости чувствительности и дозовой характеристики блоков-компараторов рентгеновского и гамма-излучения на дозиметрических установках из состава государственных эталонов Российской Федерации; при исследовании дозиметрических характеристик серийно выпускаемых средств измерений предприятием «АТОМТЕХ» в диапазоне мощности дозы 0,03 – 0,1 мкЗв/ч в низкофоновой камере КФ-АТ12; при измерениях мощности дозы на эталонной дозиметрической гамма-установке УДГ-АТ110 и дозиметрическом стенде СДГ-АТ1 на предприятии «АТОМТЕХ» в диапазоне 0,1 – 1000 мкЗв/ч (мкГр/ч) (имеется 3 акта о внедрении результатов в УП «АТОМТЕХ»).

Разработана, метрологически аттестована и внесена в Государственный Реестр Республики Беларусь методика калибровки дозиметров на основе сцинтилляционных детекторов, предназначенных для околофоновых измерений [24].

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 23 научных работах, из которых: 7 статей в научных изданиях в соответствии с пунктом 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 5,21 авторского листа), 1 статья в сборнике научных статей, 2 статьи в сборниках материалов научных конференций, 13 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и пяти приложений. Полный объем диссертации составляет 145 страниц, в том числе 46 рисунков занимают 27 страниц, 22 таблицы занимают 14 страниц, пять приложений занимают 23 страницы. Библиографический список содержит 90 наименований, включая собственные публикации соискателя ученой степени (на 10 страницах).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассмотрено состояние отечественных и зарубежных исследований и экспериментальных работ, посвященных применению сцинтилляционных блоков детектирования на основе NaI(Tl) детекторов для решения различных дозиметрических задач. *В первом и втором разделах* проанализированы основные преимущества и недостатки NaI(Tl) детекторов. Показано, что основным недостатком NaI(Tl) детекторов для задач дозиметрии является сложная зависимость эффективности регистрации гамма-квантов от их энергии, решением которой может являться применение функции радиационного отклика. *В третьем разделе* рассматриваются особенности проведения измерений в полях рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных и околофоновых уровней по мощности дозы для задач контроля окружающей среды при использовании высокочувствительных средств измерений согласно требованиям международных стандартов для приборов радиационной защиты.

Вторая глава посвящена методикам проведения экспериментальных исследований и калибровки средств измерений по мощности дозы околофоновых уровней для обеспечения контроля радиационной обстановки в окружающей среде. *В первом разделе* рассматриваются условия применения методов измерений и калибровки в полях рентгеновского и гамма-излучения околофоновых уровней по мощности дозы, описываются основные компоненты

окружающего радиационного фона. Описан метод калибровки средств измерений с использованием эталонного средства по мощности дозы в полях гамма-излучения околофоновых уровней. Метод применим при условии, что дозовая характеристика и ее линейность в заданном диапазоне энергий и мощности дозы для данного эталонного средства измерений детально исследованы. Благодаря тому, что оба измерения проводятся при одних и тех же условиях, метод замещения позволяет исключать систематические погрешности измерений, вызываемые погрешностями эталонного средства измерений, служащего для сравнения измеряемой величины с исследуемым средством измерений.

Во втором и третьем разделах описаны экстраполяционный и компенсационный методы калибровки средств измерений в условиях минимального влияния внешнего радиационного фона. Экстраполяционный метод основан на определении чувствительности к излучению радионуклидного источника по результатам определения радиационного фона путем экстраполяции показаний мощности дозы к «нулевой» мощности дозы от источника. Компенсационный метод (без источника и с источником излучения по разностному эффекту) позволяет устранить необходимость определения откликов к космической и терригенной составляющей радиационного фона, влияние собственного фона средства измерений.

В четвертом и пятом разделах приводятся определения основной относительной погрешности и оценивание неопределенности измерений мощности дозы в полях гамма-излучения околофоновых уровней.

В третьей главе рассматривается спектрометрический метод дозиметрии для создания дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования. Метод оценки мощности дозы по энергии фотонов в спектре с использованием функции радиационного отклика является достаточно гибким и обеспечивает надежные результаты, совпадающие с современной концепцией радиационного контроля, так как при измерении дозы присутствует аппаратурный спектр излучения и доступна информация об энергии излучения.

В первом разделе рассмотрен спектрометрический метод дозиметрии фотонного излучения на основе преобразования измеренного аппаратурного спектра. С помощью этого метода полная мощность дозы находится с использованием функции радиационного отклика из измеренного амплитудного распределения фотонного излучения без применения методов восстановления спектра. *Во втором разделе* описан расчет аппаратурных

спектров блоков детектирования и других характеристик, рассчитанных методом Монте-Карло с помощью программного комплекса *SNEGMONT*.

В третьем разделе описан адаптированный метод расчета функции радиационного отклика. Представлен процесс расчета функций радиационного отклика для блоков-компараторов рентгеновского и гамма-излучения с применением адаптированного метода. Адаптированный метод основан на использовании полиномиальной функции, на анализе количества и расположения границ энергетических интервалов средства измерений, изменении аппаратурного спектра от загрузки. Анализ осуществляется для серий аппаратурных спектров с минимально и максимально возможной загрузкой по скорости счета для конкретного средства измерений во всем энергетическом диапазоне с использованием измеренных и расчетных аппаратурных спектров [2, 7].

При адаптации метода расчета сделан анализ влияния количества энергетических интервалов и их границ на энергетическую зависимость чувствительности и нелинейность дозовой характеристики.

Проведен сравнительный анализ метрологических характеристик серийно выпускаемых блоков детектирования и блоков детектирования, разработанных на базе данных серийно выпускаемых блоков с применением адаптированного метода расчета функций радиационного отклика.

В четвертой главе представлены результаты разработки, калибровки и применения блоков-компараторов рентгеновского и гамма-излучения на основе сцинтилляционных блоков детектирования для определения дозиметрических характеристик полей рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных уровней по мощности дозы (рисунок 1). *В первом разделе* представлен процесс калибровки энергетической шкалы сцинтилляционных блоков детектирования из состава блоков-компараторов для последующего применения для них расчетов функций радиационного отклика. *Во втором разделе* приводится состав и основные характеристики сцинтилляционных блоков-компараторов с реализацией функций радиационного отклика, разработанных на предприятии «АТОМТЕХ» на основе NaI(Tl) детекторов по техническим заданиям автора. Блоки-компараторы позволяют измерять воздушную керму, AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы и экспозиционную дозу. *Третий раздел* посвящен результатам исследований основных метрологических характеристик и калибровке блоков-компараторов во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» на государственных эталонах Российской Федерации [1]. Представлены результаты исследования дозовой характеристики блоков-компараторов по мощности кермы в воздухе в полях гамма-излучения в диапазоне 0,03 - 650 нГр/с (0,1 мкГр/ч – 2 мГр/ч) и

энергетической зависимости чувствительности в диапазоне энергий от 5 до 1250 кэВ (рисунок 2) с использованием эталонных установок рентгеновского излучения и гамма-излучения из состава эталонов Российской Федерации.

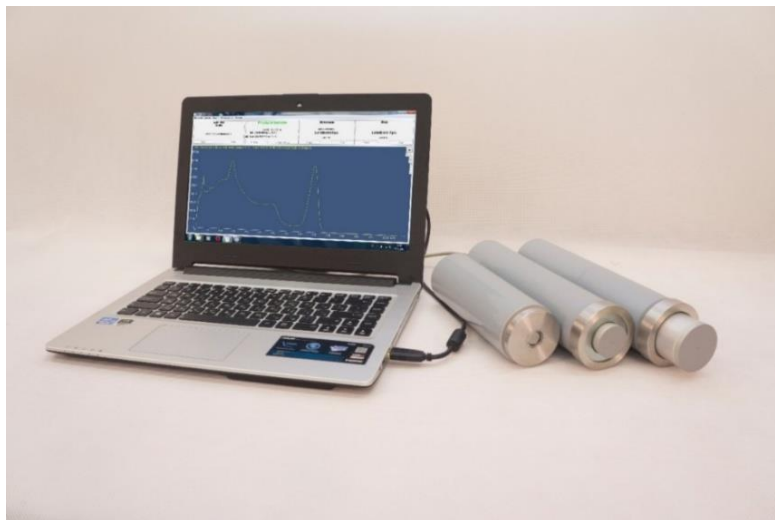


Рисунок 1. – Блоки-компараторы рентгеновского и гамма-излучения и ПК со специализированным ПО

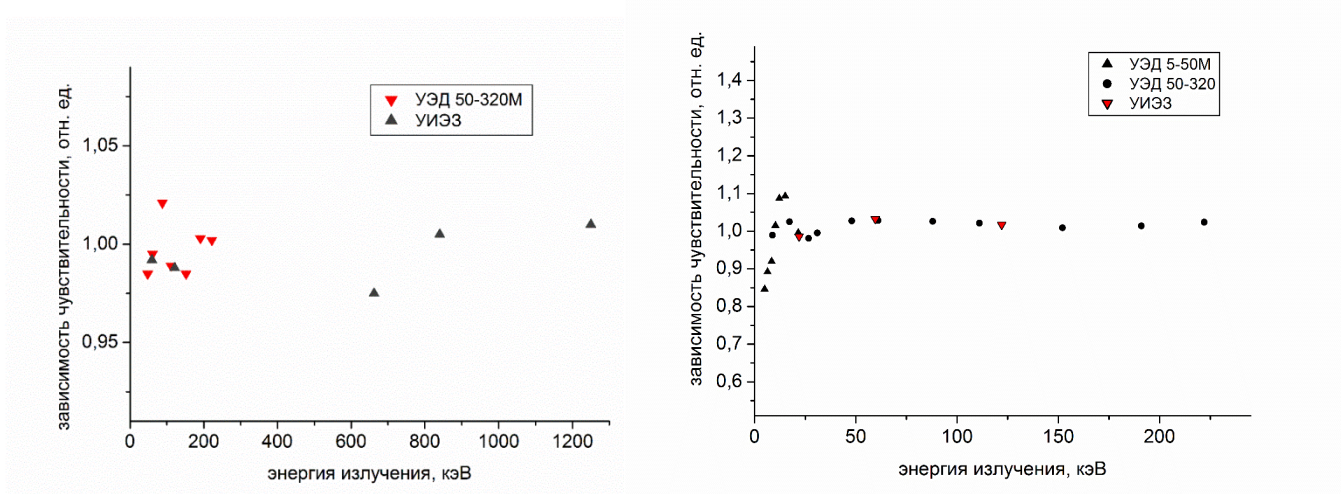


Рисунок 2. – Энергетическая зависимость чувствительности блока-компаратора БКМГ–АТ1102 (NaI(Tl) Ø40×40 мм) в диапазоне энергий от 40 до 1250 кэВ (слева) и блока-компаратора БКМГ–АТ1104 (NaI(Tl) Ø9×2 мм с Be окном) в диапазоне энергий от 5 до 222 кэВ (справа)

В конце раздела приведены примеры использования блоков-компараторов на предприятии «АТОМТЕХ» и «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» для решения дозиметрических задач в полях рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных уровней по мощности дозы, в том числе в составе государственного вторичного эталона ГВЭТ 8-2 Российской Федерации.

Пятая глава посвящена апробированию методики калибровки дозиметрических средств измерений по мощности дозы в полях гамма-излучения околофоновых уровней для задач радиационного мониторинга, калибровке блоков-компараторов по мощности дозы в полях гамма-излучения околофоновых уровней, использованию блоков-компараторов для калибровки средств измерений по мощности дозы в низкофоновой камере.

В первом разделе представлены результаты апробации методики калибровки, результаты предварительной калибровки блоков-компараторов в полях гамма-излучения околофоновых уровней по мощности дозы с использованием точечных источников гамма-излучения на водохранилище и в низкофоновой камере на территории предприятия «АТОМТЕХ» (при минимальном влиянии естественных радионуклидов).

В результате проведенных исследований на водохранилище и в низкофоновой камере были определены отклики блоков-компараторов на составляющие окружающего радиационного фона согласно рекомендациям международных стандартов.

Для предварительной калибровки блоков-компараторов выбирались по три контрольных точки для гамма-источника с радионуклидом ^{137}Cs , рассчитывались расстояния от источника до детектора с использованием керма-постоянной для данного радионуклида, на которых выполнялись измерения мощности дозы. Измерения проводились с использованием компенсационного и экстраполяционного методов калибровки блоков-компараторов гамма-излучения [3, 4, 12].

Сравнительный анализ полученных аппаратурных спектров и результатов измерения мощности дозы от точечных источников гамма-излучения с радионуклидом ^{137}Cs , полученных с использованием блоков-компараторов на водохранилище и в низкофоновой камере, показал возможность проведения измерений и калибровок в низкофоновой камере при соблюдении методики калибровки в условиях наличия рассеянного излучения от стен камеры.

Во втором разделе представлены результаты калибровки блоков-компараторов в низкофоновой лаборатории SPLBRL Национального научно-исследовательского института физики и ядерной инженерии (Румыния) в соляной шахте (при минимальном влиянии естественных радионуклидов и компоненты космического излучения).

После предварительной калибровки на водохранилище и в низкофоновой камере были выполнены калибровки блоков-компараторов в околофоновых полях гамма-излучения в низкофоновой лаборатории SPLBRL с применением компенсационного и экстраполяционного методов. Описана процедура

калибровки блоков-компараторов в низкофоновой лаборатории с использованием вторичного эталона мощности дозы. Полученные калибровочные коэффициенты в низкофоновой камере на предприятии «АТОМТЕХ» и в лаборатории SPLBRL хорошо согласуются между собой, что свидетельствует о схожих условиях при проведении измерений мощности дозы с использованием источников гамма-излучения с радионуклидом ^{137}Cs . В свою очередь данный факт дает основания для использования низкофоновой камеры для проведения калибровок средств измерений в полях гамма-излучения околофоновых уровней по мощности дозы с использованием блоков-компараторов [4, 8, 12].

Приведены результаты измерения и определения основных компонент радиационного фона с использованием сцинтилляционных блоков детектирования, входящих в состав блоков-компараторов. Приведен сравнительный анализ полученных данных при использовании двух методов измерения мощности дозы (компенсационного и экстраполяционного) на водохранилище, в низкофоновой камере и в низкофоновой лаборатории.

По результатам калибровки блоков-компараторов в низкофоновой лаборатории SPLBRL получены свидетельства о калибровке, данные из которого используются при определении дозиметрических характеристик полей гамма-излучения околофоновых уровней по мощности дозы, создаваемых с использованием источников гамма-излучения с радионуклидом ^{137}Cs в низкофоновой камере на предприятии «АТОМТЕХ».

Сравнительный анализ полученных значений мощности дозы радиационного фона с применением компенсационного и экстраполяционного метода калибровки дает основание считать оба метода приемлемыми при проведении измерений мощности дозы в околофоновых полях гамма-излучения при минимальном влиянии естественного радиационного фона. В результате объединения результатов калибровки блока-компаратора гамма-излучения БКМГ-АТ1102 в низкофоновой лаборатории в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч и во «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в диапазоне 0,1 – 200 мкЗв/ч на одном графике (рисунок 3) получена дозовая характеристика блока-компаратора с хорошей линейностью во всем рабочем диапазоне измерения мощности дозы (0,03 – 200 мкЗв/ч).

Третий раздел посвящен задаче расположения эффективного центра энергосвечения сцинтилляционных NaI(Tl) детекторов при измерениях мощности дозы в условиях малых расстояний «источник-детектор» в низкофоновой камере методом замещения или при расчетах расстояний с использованием кермы-постоянной. Предложен оригинальный метод расчета

положения эффективного центра энерговыделения неорганических детекторов при их использовании на малых расстояниях от точечных источников гамма-излучения. Представлены расчеты и функциональные зависимости положения эффективного центра энерговыделения NaI(Tl) детекторов от расстояния до точечных источников гамма-излучения с радионуклидами ^{241}Am и ^{137}Cs и от геометрии измерения в условиях малых расстояний (10 – 100 см) «источник-детектор» для ряда измерительных задач, в том числе при работе в низкофоновой камере [6].

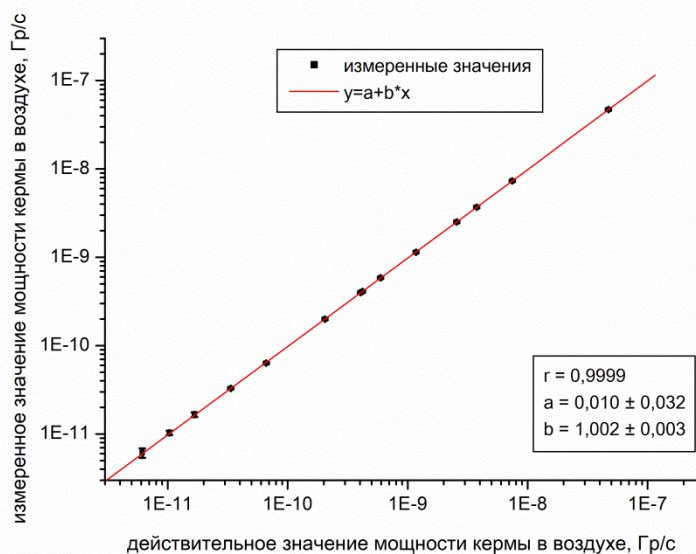


Рисунок 3. – Зависимость показаний блока-компаратора гамма-излучения с детектором NaI(Tl) $\varnothing 40 \times 40$ мм от мощности кермы в воздухе гамма-излучения источников с радионуклидом ^{137}Cs (662 кэВ) в полях низкоинтенсивных и околофоновых уровней

В четвертом разделе представлена дозиметрия полей гамма-излучения околофоновых уровней с использованием блоков-компараторов в низкофоновой камере. Описана процедура калибровки, показаны отличия калибровки в низкофоновой камере от калибровки в низкофоновой лаборатории и на дозиметрических поверочных установках при условии наличия естественного радиационного фона. Показано, что при передаче единицы мощности дозы с использованием средства измерений, калибровка которого прослеживается к национальным или международным эталонам, большое значение имеет спектральное распределение, формируемое радионуклидными источниками, геометрия пучка. Приведены значения калибровочных коэффициентов для блоков-компараторов, полученные в сертифицированной низкофоновой лаборатории и в низкофоновой камере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Адаптированный метод расчета функции радиационного отклика, обеспечивающий минимизацию энергетической зависимости чувствительности и нелинейности дозовой характеристики дозиметрических средств измерений на основе NaI(Tl) сцинтилляционных блоков детектирования за счет использования полиномиальной интерполяции, оптимизации энергетических интервалов, применении экспериментальных и теоретических аппаратурных спектров [2, 7, 8, 11, 16].

2. Разработаны блоки-компараторы рентгеновского и гамма-излучения на базе сцинтилляционных блоков детектирования для определения дозиметрических характеристик полей рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных уровней по мощности кермы в воздухе в диапазоне 0,1 – 1000 мкГр/ч с нелинейностью дозовой характеристики, не превышающей $\pm 3\%$ и энергетической зависимостью чувствительности в пределах $\pm 5\%$ в диапазоне энергий 20 – 1500 кэВ ($\pm 15\%$ в диапазоне энергий 5 – 17 кэВ) [1, 5, 8, 10, 11, 14, 15, 22, 23].

3. Разработана и внедрена методика калибровки дозиметров в полях гамма-излучения околофоновых уровней в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч в условиях минимального влияния естественного радиационного фона в низкофоновой камере. Результаты калибровки блоков-компараторов в низкофоновой камере хорошо согласуются с результатами калибровки в низкофоновой лаборатории при обеспечении корректных измерений радиационного фона, обеспечении точного позиционирования детектора относительно источника излучения и соблюдении методики проведения измерений. Подтверждена линейность дозовых характеристик блоков-компараторов во всем рабочем диапазоне мощностей доз, включая околофоновые уровни [3, 4, 9, 10, 17, 18, 19, 20, 21].

4. Получены функциональные зависимости положения эффективного центра энерговыделения NaI(Tl) детекторов $\text{Ø}40 \times 40$ мм и $\text{Ø}25 \times 40$ мм от геометрии измерения и расстояния до точечных источников гамма-излучения с радионуклидами ^{241}Am и ^{137}Cs в условиях малых расстояний (10 – 100 см) «источник-детектор» для ряда измерительных задач, в том числе при работе в низкофоновой камере или на установке с защитой от внешнего радиационного фона. Предложен оригинальный метод расчета положения эффективного центра энерговыделения неорганических детекторов при их использовании на малых расстояниях от точечных источников гамма-излучения. [6, 12, 13].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Применение адаптированного метода расчета функции радиационного отклика позволяет создавать на базе сцинтилляционных блоков детектирования высокоточные дозиметрические средства измерений, что в свою очередь делает данное оборудование конкурентоспособным за счет высокой чувствительности, широкого диапазона измерения мощности дозы, хорошей энергетической зависимости и низкой стоимости.

2. Использование функциональных зависимостей положения эффективного центра энерговыделения средств измерений на основе NaI(Tl) детекторов от расстояния до точечного источника гамма-излучения обеспечивает высокую точность позиционирования таких средств измерений для ряда измерительных задач в условиях малых расстояний «источник-детектор» при использовании метода замещения и расчетов с применением керма-постоянной.

3. Применение методики калибровки дозиметрических средств измерений в полях гамма-излучения околофоновых уровней (0,03 – 0,1 мкЗв/ч) при минимальном влиянии естественного радиационного фона с использованием низкофоновой камеры позволяет снизить нижнюю границу диапазона измерений мощности дозы серийно выпускаемых дозиметрических средств измерений до 0,03 мкЗв/ч. Это способствует разработке и созданию дозиметрических средств измерений, соответствующих международным стандартам, что также повышает конкурентоспособность данной аппаратуры (имеется 2 акта о внедрении).

4. Использование блоков-компараторов в составе эталонных дозиметрических установок увеличивает возможности применения данных установок, снижая нижнюю границу диапазона измерений мощности дозы до 0,1 мкЗв/ч. Это подтверждается применением данных блоков-компараторов во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в составе вторичного эталона Российской Федерации и на предприятии «АТОМТЕХ» в составе дозиметрических установок (имеется акт о внедрении).

5. Расширение диапазона измерения серийно выпускаемых блоков детектирования и приборов позволило увеличить сферы применения данной продукции, что подтверждается применением в системах АСКРО вокруг атомных объектов и станций в РБ и за рубежом (в том числе вокруг БелАЭС); в системах радиационного контроля на медицинских объектах и в атомной промышленности; в рамках исследовательских проектов по выявлению загрязнений территорий после аварии на АЭС Фукусима-1, в CERN, в беспилотных системах и т.д.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. 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. – 2017. – № 1(75). – С. 33–37.

2. Лукашевич, Р.В. Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования / Р.В. Лукашевич, Г.А. Фоков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 246–253.

3. Лукашевич, Р.В. Калибровка сцинтилляционного блока-компаратора в низкоинтенсивных полях фотонного излучения по мощности дозы / Р.В. Лукашевич, Ю.А. Верхуша // Метрология и приборостроение. – 2017. – № 3(77). – С. 25–30.

4. Лукашевич, Р.В. Дозиметрия полей гамма-излучения околофонового уровня с использованием высокочувствительного сцинтилляционного блока-компаратора / Р.В. Лукашевич, В.Д. Гузов, В.А. Кожемякин // АНРИ. – 2019. – № 3 (98). – С. 29–41.

5. Новиченко, А.В. Создание полей рентгеновского излучения с низкой мощностью дозы для исследования энергетической зависимости чувствительности дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования / А.В. Новиченко, Р.В. Лукашевич, К.Г. Сеньковский // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 128–137.

6. Лукашевич, Р.В. Расчет положения эффективного центра энерговыделения сцинтилляционных детекторов для задач калибровки при малых расстояниях «источник-детектор» / Р.В. Лукашевич, Г.А. Фоков // Приборы и методы измерений. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 239–248.

7. Лукашевич, Р.В. Адаптированный метод расчета функции радиационного отклика при создании высокочувствительных образцовых средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования с NaI(Tl) кристаллами для дозиметрии малоинтенсивных и околофоновых уровней / Р.В. Лукашевич // АНРИ. – 2021. – № 4 (107). – С. 41–51.

Статьи в других научных изданиях

8. Применение сцинтилляционных блоков детектирования для калибровки полей гамма-излучения по мощности дозы / Р.В. Лукашевич, В.Д. Гузов, Г.А. Фоков, В.А. Кожемякин // Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники. Аспекты сцинтилляционной техники : сб. ст. / Ин-т сцинтилляц. материалов НАН Украины; ред.: А.В. Гектин. – Харьков, 2017. – С. 199–207.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9. Лукашевич, Р.В. Калибровка сцинтилляционного блока-компаратора в низкоинтенсивных полях фотонного излучения по мощности дозы / Р.В. Лукашевич, В.Д. Гузов, В.А. Кожемякин // 175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений : сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 14–15 июня 2017 г. / Федераль. аг-во по технич. регулир-ю и метрологии «РОССТАНДАРТ»; ФГ УП «Всерос. НИИ метрологии им. Д.И. Менделеева». – С.-Пб., 2017. – С. 194–208.

10. Application Scintillation Comparators for Calibration Low Intense Gamma Radiation Fields by Dose Rate in the Range of 0.03-0.1 $\mu\text{Sv/h}$ / R. Lukashevich, Y. Verhusha, V. Guzov, V. Kozemyakin // Springer Proceedings in Physics. – 2019. – Vol. 227: Sixth International Conf. “Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies ISMART 2018”, Minsk, 9-12 Oct. 2018 / Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University (Belarus); Institute for Scintillation Materials, National Academy of Sciences (Ukraine); Joint Institute for Nuclear Research (Russia). – P. 221–235.

Тезисы

11. Лукашевич, Р.В. Спектрометрический метод измерения мощности дозы излучения с использованием неорганических сцинтилляционных детекторов / Р.В. Лукашевич, Г.А. Фоков, Г.И. Шульгович // Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии ППСР-2009 : тез. докл. XI Междунар. совещ., пос. Агой Краснодарского края, 20-25 сент. 2009 г. / Мин. обр. Респ. Бел.; БГУИР; ФГУП «Всерос. науч.-исслед. ин-т автоматике имени Н.Л. Духова»; АО «Русатом Автоматизированные системы управления»; Региональ. сеть «Образование и подготовка специалистов в области ядерных технологий (STAR-NET)». – Москва, 2009. – С. 38–39.

12. Лукашевич, Р.В. Расчет эффективного центра сцинтилляционного детектора гамма-излучения и его учет при дозиметрическом контроле радиационных упаковок / Р.В. Лукашевич, Г.А. Фоков, Г.И. Шульгович

// Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии ППСР-2009 : тез. докл. XI Междунар. совещ., пос. Агой Краснодарского края, 20-25 сент. 2009 г. / Мин. обр. Респ. Бел.; БГУИР; ФГУП «Всерос. науч.-исслед. ин-т автоматики имени Н.Л. Духова»; АО «Русатом Автоматизированные системы управления»; Региональ. сеть «Образование и подготовка специалистов в области ядерных технологий (STAR-NET)». – Москва, 2009. – С. 40.

Лукашевич, Р. Расчет эффективного центра сцинтилляционного детектора гамма-излучения и его учет при дозиметрическом контроле радиационных упаковок / Р.В. Лукашевич // Сахаровские чтения 2011 года: экологические проблемы XXI века: материалы 11-й Междунар. науч. конф., Минск, 19–20 мая 2011 г. / Мин. обр. Респ. Бел.; Мин. природ. ресурсов и охраны окр. среды Респ. Бел.; Деп. по ликвид. последствий катастрофы на ЧАЭС М-ва по чрез. сит. Респ. Бел.; Общест. совет Базовой орг. по экол. обр. стран СНГ; БРФФИ; Центр Всемир. Здор. «Великие Озера» Иллиной. У-та (Чикаго, США); Немец. экон. гр. в Беларуси (Берлин, Германия); МГЭУ им. А.Д. Сахарова. – Мн., 2011. – С. 300.

13. Лукашевич, Р.В. Исследование положения эффективного центра сцинтилляционного детектора гамма-излучения с помощью метода Монте-Карло / Р.В. Лукашевич, Г.А. Фоков // Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии ППСР-2011 : тез. докл. XII Междунар. совещ., Санкт-Петербург, 10-14 окт. 2011 г. / ЭкоСфера. – С.-Пб., 2011. – С. 48.

14. Comparator units for metrological certification of weak X-ray and gamma radiation fields by dose rate / R. Lukashevich, A. Antonov, V. Antonov, A. Barchenko, V. Guzov, D. Katsevich, V. Kozhemyakon, G. Fokov // LXIV International Conf. «NUCLEUS 2014»: Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Power Engineering and Nuclear Technologies: book of abstr., Minsk, July 1-4, 2014 / Russian Ac. of Sciences; Belarus. State Univ.; National Ac. of Sciences of Belarus; ed.: A.K. Vlasnikov. – Minsk, 2014. – P. 216.

15. Блоки-компараторы для метрологической аттестации слабых полей рентгеновского и гамма-излучения по мощности дозы / Р.В. Лукашевич, А.В. Антонов, В.И. Антонов, А.Г. Барченко, В.Д. Гузов, В.А. Кожемякин, Г.А. Фоков // Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии ИСМАРТ-2014 : тез. докл. IV Междунар. конф., Минск, 12–16 окт. 2014 г. / НИИ ЯП БГУ (Беларусь); И-т сцинтилляц. м-в НАН (Укр); Объед. И-т ядер. исслед. (Россия). – Ред.: М.В. Коржик. – Минск, 2014. – С. 100–101.

16. Создание блоков-компараторов для метрологической аттестации полей фотонного излучения по мощности дозы на базе серийно выпускаемых блоков детектирования / Р.В. Лукашевич, А.В. Антонов, В.И. Антонов, А.Г. Барченко, В.Д. Гузов, Е.А. Коновалов, В.А. Кожемякин, Г.А. Фоков // Проблемы

прикладной спектрометрии и радиометрии ППСР-2015 : тез. докл. XIII Междунар. совещ., Санкт-Петербург, 05-08 окт. 2015 г. / ЭкоСфера. – С.-Пб., 2015. – С. 120–122.

17. Калибровка сцинтилляционных блоков-компараторов для метрологического обеспечения измерений мощности дозы от 0,1 мкЗв/ч на поверочных дозиметрических установках / Р.В. Лукашевич, А.В. Антонов, В.И. Антонов, А.Г. Барченко, В.Д. Гузов, Е.А. Коновалов, В.А. Кожемякин, Г.А. Фоков // Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии ИСМАРТ–2016 : сб. тез. докл. 5-й Междунар. конф., Минск, 26-30 сент. 2016 г. / НИИ ЯП БГУ (Беларусь); И-т сцинтилляц. м-в НАН (Укр); Объед. И-т ядер. исслед. (Россия). – Ред.: М.В. Коржик. – Минск, 2016. – С. 78-79.

18. Лукашевич, Р.В. Особенности калибровки дозиметров радиационной защиты в низкоинтенсивных полях фотонного излучения / Р.В. Лукашевич, В.Д. Гузов, В.А. Кожемякин // Обеспечение единства измерений в области использования атомной энергии : тез. докл. 7-й науч.-практ. конф., Сочи, 3-7 окт. 2016 г. / Метрол. служба госкорпорации «Росатом»; Академия «Росатома». – М., 2016. – С. 71–72.

19. Лукашевич, Р.В. Калибровка сцинтилляционных блоков-компараторов в низкоинтенсивных полях фотонного излучения по мощности кермы в воздухе / Р.В. Лукашевич // Метрология-2017 : тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 4 – 5 апреля 2017 / Бел. гос. ин-т метрологии; редкол.: В.Л. Гуревич [и др.]. – Минск, 2017. – С. 84–85.

20. Лукашевич, Р.В. Калибровка сцинтилляционных блоков-компараторов в низкоинтенсивных полях фотонного излучения по мощности дозы / Р.В. Лукашевич // 175 лет ВНИИМ имени Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений : сб. аннот. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 14-15 июня 2017 г. / Федераль. Аг-во по технич. регулир. и метрологии «Росстандарт»; ФГУП «Всерос. НИИ метрологии им. Д.И. Менделеева». – С.-Пб., 2017. – С. 191–193.

21. Метрологическое обеспечение полей фотонного излучения по мощности дозы от 0,03 мкЗв/ч с использованием блоков-компараторов / Р.В. Лукашевич, В.Д. Гузов, Ю.А. Верхуша, В.А. Кожемякин // Ядерная наука и технологии : тез. докл. Междунар. науч. форума посвящ. 60-летию И-та ядер. физики, Алматы, 12-15 сент. 2017 г. / И-т ядерной физики Респ. Казахстан; ред.: Е.А. Кенжин, Н. Буртебаев, О.В. Тиванова. – Алматы, 2017. – С. 355.

Метрологическое обеспечение полей фотонного излучения по мощности дозы от 0,03 мкЗв/ч с использованием сцинтилляционных блоков-компараторов

/ Р.В. Лукашевич, В.Д. Гузов, Ю.А. Верхуша, В.А. Кожемякин // Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии ППСР-2017 : 14-е междунар. совещ., Москва, 4–6 октября 2017 г. : тез.докл. / ЭкоСфера. – Москва, 2017. – С. 34–36.

22. Лукашевич, Р.В. Качества рентгеновского излучения эталонной поверочной установки УПР-АТ300 при малых мощностях доз для исследования энергетической зависимости чувствительности сцинтилляционных блоков детектирования / Р.В. Лукашевич, А.В. Новиченко, К.Г. Сеньковский // Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии ППСР–2019 : тез. докл. XV Междунар. совещ., Казань, 7–11 окт. 2019 г. / ЧОУ ДПО «УЦ «МЕДТЕХАТОМ». – Казань, 2019. – С. 51–53.

23. Современное эталонное поверочное оборудование для градуировки дозиметрической аппаратуры / Р.В. Лукашевич, В.Д. Гузов, В.Д. Зайцев, В.А. Кожемякин, В.А. Николаев, В.Л. Раскоша, К.Г. Сеньковский // Автоматизированные системы управления технологическими процессами АЭС и ТЭС : материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 апреля 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел. ; БГУИР ; ФГУП «Всерос. науч.-исслед. и-т автоматики имени Н.Л. Духова»; АО «Русатом. Автоматизированные системы управления»; Региональ. сеть «Образование и подготовка специалистов в области ядерных технологий (STAR-NET)». – Минск, 2021. – С. 125–126.

Методика

24. Дозиметры на основе сцинтилляционных детекторов, предназначенные для низкофоновых измерений. Методика калибровки. МК.АТ. 01-2020/ГЛЛ (разработчики: В.Д. Гузов, Р.В. Лукашевич, С.В. Лазаренко): утв. директором Научно-производственного унитарного предприятия «АТОМТЕХ» ОАО «МНИПИ» 29.07.2020 г. – Минск, 2020. – 17 стр.



РЕЗЮМЕ

Лукашевич Роман Васильевич

ДОЗИМЕТРИЯ ПОЛЕЙ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ И ОКОЛОФОНОВЫХ УРОВНЕЙ

Ключевые слова: сцинтилляционный блок детектирования, спектрометрический метод дозиметрии, рентгеновское и гамма-излучение, мощность дозы, околофоновые измерения, калибровка средств измерений.

Цель работы: метрологическое обеспечение дозиметрии полей рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных и околофоновых уровней (0,03 – 1000 мкГр/ч (мкЗв/ч)) с использованием разработанных блоков-компараторов рентгеновского и гамма-излучения на основе NaI(Tl) детекторов.

Методы исследований и использованная аппаратура: спектрометрический метод дозиметрии, метод замещения, метод компаратора, метод расчета мощности дозы с использованием керма-постоянной, метод Монте-Карло, сцинтилляционные блоки детектирования.

Полученные результаты и их новизна: Адаптированный метод расчета функций радиационного отклика для сцинтилляционных блоков детектирования на основе NaI(Tl) детекторов для создания высокоточных средств измерений.

Разработаны блоки-компараторы для определения дозиметрических характеристик полей рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных уровней по мощности кермы в воздухе в диапазоне 0,1 – 1000 мкГр/ч.

Разработана и внедрена методика калибровки дозиметров в полях гамма-излучения околофоновых уровней в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч в условиях низкофоновой камеры.

Расчитаны функциональные зависимости положения эффективного центра энерговыделения NaI(Tl) детекторов Ø40×40 мм и Ø25×40 мм от расстояния до точечных источников гамма-излучения с радионуклидами ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs в условиях малых расстояний (10 – 100 см) «источник-детектор».

Рекомендации по использованию: Разработанные блоки-компараторы применяются в составе поверочных дозиметрических установок на предприятии «АТОМТЕХ» и «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» для обеспечения нижней границы диапазона измерения мощности дозы на уровне 0,1 мкЗв/ч, для определения основной погрешности дозиметрических средств измерений в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч на предприятии «АТОМТЕХ».

Область применения: дозиметрия полей рентгеновского и гамма-излучения низкоинтенсивных и околофоновых уровней.

РЭЗІЮМЭ**Лукашэвіч Раман Васільевіч****ДАЗІМЕТРЫЯ ПАЛЁЎ РЭНТГЕНАЎСКАГА І ГАМА-
ВЫПРАМЕНЬВАННЯ НІЗКАІНТЭНСІЎНЫХ І КАЛЯ ФОНАВЫХ
ЎЗРОЎНЕЙ**

Ключавыя словы: сцынтыляцыйны блок дэтэктавання, спектраметрычны метада дазіметрыі, рэнтгенаўскае і гама-выпраменьванне, магутнасць дозы, каля фонавае вымярэнне, каліброўка сродкаў вымярэння.

Мэта працы: метралагічнае забеспячэнне дазіметрыі палёў рэнтгенаўскага і гама-выпраменьвання нізкаінтэнсіўных і каля фонавых узроўней (0,03 – 1000 мкГр/г (мкЗв/г)) з выкарыстаннем распрацаваных блокаў-кампаратараў на аснове NaI(Tl) сцынтыляцыйных блокаў дэтэктавання.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: спектраметрычны метада дазіметрыі, метада замяшчэння, метада кампаратара, метада разліку магутнасці дозы з выкарыстаннем керма-пастаяннай, метада Монтэ-Карла, сцынтыляцыйныя блокі дэтэктавання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Адаптаваны метада разліку функцый радыяцыйнага водгуку для сцынтыляцыйных блокаў дэтэктавання на аснове NaI(Tl) дэтэктараў для стварэння высокадакладных сродкаў вымярэнняў.

Распрацаваны блокі-кампаратары для вызначэння дазіметрычных характарыстык палёў рэнтгенаўскага і гама-выпраменьвання нізка інтэнсіўных ўзроўняў па магутнасці кермы ў паветры ў дыяпазоне 0,1 – 1000 мкГр/г.

Распрацавана і ўкаранёна метадыка каліброўкі дазіметраў у палях гама-выпраменьвання каля фонавых ўзроўняў ў дыяпазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/г ва ўмовах нізка фонавай камеры.

Разлічаны функцыянальныя залежнасці становішча эфектыўнага цэнтра энергавылучэння NaI(Tl) дэтэктараў Ø40×40 мм і Ø25×40 мм ад адлегласці да кропкавых крыніц гама-выпраменьвання з радыёнуклідамі ²⁴¹Am і ¹³⁷Cs ва ўмовах малых адлегласцяў (10 – 100 см) «крыніца-дэтэктар».

Рэкамендацыі па выкарыстанні: Распрацаваныя блокі-кампаратары выкарыстоўваюцца ў складзе эталонных дазіметрычных устаноў на прадпрыемстве «АТАМТЭХ» і ў «ВНІМ ім. Д.І. Мендзялеева» для зніжэння ніжняй мяжы дыяпазону вымярэння магутнасці дозы да 0,1 мкЗв/г, для вызначэння дозавай характарыстыкі дазіметрычных сродкаў вымярэнняў у дыяпазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/г на прадпрыемстве «АТАМТЭХ».

Вобласць ужывання: дазіметрыя палёў рэнтгенаўскага і гама-выпраменьвання нізка інтэнсіўных і каля фонавых ўзроўняў.

SUMMARY**Lukashevich Raman****DOSIMETRY OF X-RAY AND GAMMA RADIATION FIELDS OF LOW-INTENSITY AND NEAR-BACKGROUND LEVELS**

Key words: scintillation detection unit, spectrometric dosimetry method, X-ray and gamma radiation, dose rate, near background measurement, measurement instrument calibration.

Work purpose: metrological support of dosimetry of X-ray and gamma radiation fields of low-intensity and near-background levels (0.03 – 1000 $\mu\text{Gy/h}$ ($\mu\text{Sv/h}$)) using the developed comparators on NaI(Tl) scintillation detection units.

Investigation methods and apparatus: spectrometric dosimetry method, substitution method, comparator method, method of dose rate calculation using kerma constant, Monte-Carlo method, scintillation detection units.

Received results and their novelty: The method of calculation of radiation response functions for scintillation detection units based on NaI(Tl) detectors is adapted for creation of high-precision dosimetric measurement instruments.

Comparators were developed to determine the dosimetric characteristics of X-ray and gamma radiation fields of low-intensity levels by kerma rate in air in the range of 0.1 - 1000 $\mu\text{Gy/h}$.

A technique for calibrating dosimeters in the near background gamma radiation fields in the range of 0.03 - 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ has been developed and implemented under conditions of minimal influence of natural background radiation in a low-background shield.

Functional dependencies of position of effective energy release center of NaI(Tl) detectors $\text{Ø}40\times 40$ mm and $\text{Ø}25\times 40$ mm on the distance to the point gamma radiation sources with radionuclides ^{241}Am and ^{137}Cs at small distances (10 – 100 cm) "source-detector" are calculated.

Recommendation for use: Developed and produced comparators are used as part of verification dosimetry units in SPE ATOMTEX and D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM) to reduce the lower limit of the dose rate measurement range to 0.1 $\mu\text{Sv/h}$, to determine the dose characteristic of dosimeters in the range 0.03 – 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ in SPE ATOMTEX.

Applicability: dosimetry of low-intensity and near background X-ray and gamma radiation fields.

