



О цифровой интеграции радиационных измерений с данными наземной лазерной съемки

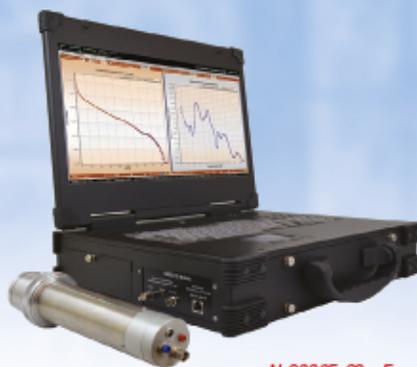
Испытания алгоритма автоматического определения импульсного излучения в дозиметре ДКС-АТ 1123

Расчеты методом Монте-Карло поправочных коэффициентов для протонного калориметра

ПРИБОР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

SDMF-1608SN

Спектрометр-дозиметр нейтронов и гамма-квантов



№90065-23 в Госреестре СИ РФ

Назначение

Спектрометр-дозиметр типа **SDMF-1608SN** является средством измерения и предназначен для измерения энергетического распределения плотности потока нейтронов и гамма-квантов в реальном времени. Также позволяет измерять интегральный поток медленных нейтронов с помощью второго детектора.

Основываясь на измерении спектров нейтронов и гамма-квантов вычисляется мощность эффективной и поглощенной дозы, а также мощность амбиентного эквивалента дозы.

Для гамма излучения также вычисляется мощность экспозиционной дозы и мощность поглощенной дозы в воздухе.

Все дозовые характеристики рассчитываются исходя из геометрии источника радиации и условий облучения человека.

Отличительные особенности

- Одновременное измерение энергетических спектров быстрых нейтронов и гамма-квантов одним детектором.
- Спектрометр-дозиметр работает в реальном масштабе времени.
- Измерение как непрерывных (например, "реакторных"), так и линейчатых (изотопных) энергетических спектров.
- Измерение плотности потока быстрых нейтронов и гамма-квантов в абсолютных единицах (частица*см⁻²*с⁻¹*МэВ⁻¹).
- Максимальная загрузка по входу детектора 3*10⁴ импульсов.

Информация для заказа

- **SDMF-1608SN** – Возимый спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 0.03 эВ до 16 МэВ и гамма-квантов от 240 кэВ до 8 МэВ.
- **UNSD-20** – Универсальный нейтронный спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 0.03 эВ до 20 МэВ и гамма-квантов от 100 кэВ до 9 МэВ.
- **SDMF-1608** – Возимый спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 1 МэВ до 19 МэВ и гамма-квантов от 500 кэВ до 8 МэВ.
- **SDMF-1206SN** – Возимый спектрометр-дозиметр с диапазоном энергий нейтронов от 0.03 эВ до 12 МэВ и гамма-квантов от 100 кэВ до 6 МэВ.

Применение

- Средство измерения энергетического распределения плотности потока нейтронов и гамма-квантов за биологической защитой ядерно-энергетических установок.
- Определение мощности эффективной дозы, мощности амбиентного эквивалента дозы и мощности поглощенной дозы нейтронов и гамма-квантов.
- Определение мощности экспозиционной дозы гамма излучения.
- Эталон плотности потока быстрых нейтронов.
- Калибратор интегральных дозиметров для гамма и нейтронных полей.
- Калибратор для поверки установок, формирующих поля излучения быстрых нейтронов и гамма-квантов.

ПАРАМЕТРЫ	ЗНАЧЕНИЯ
Диапазон энергий регистрируемого нейтронного излучения (с дополнительным детектором медленных нейтронов)	(0.03 эВ – 100 кэВ)* 500 кэВ – 16 МэВ
Диапазон энергий регистрируемого гамма излучения	240 кэВ – 8 МэВ
Количество энергетических каналов быстрых нейтронов и гамма-квантов	1024
Нижняя и верхняя граница измерения мощности эффективной дозы	(от 0.2 до 17 500**) мкЗв/ч
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении интегральной (дифференциальной) плотности потока нейтронного излучения	не более ±7% (±15%)
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения	не более ±12%
Среднее отклонение показаний от истинных значений при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы Н*(10) гамма излучения	не более +12%
Энергетическое разрешение на энергии 662 кэВ (137 Cs) при детекторе 40x40	не более 12%
Анизотропия для нейтронного излучения	не более +30%
Максимальный поток нейтронов через сцинтиллятор (без учета восстановления)	10 ³ н/см ²
Рабочая загрузка детектора	10 ⁴ импульс/с
Размерность вычисляемых доз	Зв/ч, Зв/с, Гр/ч, Гр/с, рад/с, рад/ч, Р/с, Р/ч
Питание от аккумулятора +12В***	не более 3 часов
Размер спектрометра-дозиметра, мм	415 x 165 x 360
Размер детектора быстрых нейтронов, мм	245 x диаметр 65
Размер детектора медленных нейтронов, мм	190 x диаметр 59
Вес спектрометра-дозиметра, включая вес детекторов	не более 10 кг

* - один энергетический канал
** - при соблюдении максимальной загрузки
*** - опция под заказ



ООО «Центр АЦП»

Россия, 125040, Москва, ул. Верхняя, д. 6

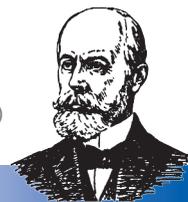
тел.: (499) 257-45-03, 257-45-09, 257-45-14

mail@centeradc.ru

www.centeradc.ru

СОДЕРЖАНИЕ номера

АНТУАН
АНРИ
БЕККЕРЕЛЬ
(1852—1908)



НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

- 3** О цифровой интеграции радиационных измерений с данными наземной лазерной съемки
И.И. Линге
- 17** Твердотельные детекторы оптических сигналов и радиации. Часть 2.2. Показатели качества детекторов
С.Л. Виноградов
- 29** Расчеты методом Монте-Карло поправочных коэффициентов для протонного калориметра
А.В. Берлянд, В.А. Берлянд, Ю.Е. Титаренко, К.В. Павлов, В.Ф. Батяев
- 38** Испытания алгоритма автоматического определения импульсного излучения в дозиметре ДКС-АТ1123
И.А. Алексейчук, А.А. Загороднюк, С.В. Лазаренко, М.В. Масюкович, А.Н. Новик, В.И. Петров, А.Ю. Тараев
- 46** Определение оптимального времени использования термолюминесцентных дозиметров при ведении индивидуального дозиметрического контроля с помощью термолюминесцентной дозиметрической автоматизированной системы Harshaw
А.А. Коваленко, М.М. Балачков, Е.А. Юрченко
- 57** Особенности изготовления кремниевых поверхностно-барьерных детекторов для радиометров радона
С.И. Лашаев, А.Р. Третьяков
- 67** Геохимические факторы, влияющие на содержание и миграцию естественных и техногенных радионуклидов в почвах Упоровского района Тюменской области
Н.Е. Гурьев, А.В. Синдирева, Н.С. Котченко, П.А. Андреевко, П.Е. Ляпина

АНРИ

АППАРАТУРА И НОВОСТИ
РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
№3 (122) 2025

Журнал находится в **ПЕРЕЧНЕ рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК)** Министерства образования и науки РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования
www.elibrary.ru

Главный редактор: А.Н. Мартынюк

Вып. редактор: М.Н. Мартынюк

Макетирование и компьютерная верстка: М.Н. Мартынюк

Адрес редакции:

124460, Москва, а/я 50, НПП «Доза»

Тел.: (495) 777-13-36,

(495) 777-84-85 (доб.605)

E-mail: anry@doza.ru

Журнал зарегистрирован комитетом РФ по печати 24 января 1995 г., свидетельство № 013255

© Научно-производственное предприятие «Доза», 2025 г.
Подписано к печати 11.08.2025 г.
Объем 6 уч.-изд.л. Тираж 400 экз.

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных объявлений

Рукописи не возвращаются
Использование материалов допускается только с письменного разрешения редакции

Фото на обложке:

Иллюстрация к статье «О цифровой интеграции радиационных измерений с данными наземной лазерной съемки»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ EDITORIAL BOARD

Jozef Sabol, профессор (доцент), г. Прага

Алексеев И.В., к.ф.-м.н., г. Санкт-Петербург

Бахур А.Е., д.г.-м.н., г.н.с., г. Москва

Будыка А.К., профессор, д.ф.-м.н., г.н.с., г. Москва

Ермилов А.П., к.т.н., г.н.с., г. Москва, Зеленоград

Жуковский М.В., профессор, д.т.н., к.ф.-м.н., г. Екатеринбург

Иванов О.П., д.ф.-м.н., г. Москва

Кожемякин В.А., к.т.н., г. Минск

Коренков И.П., профессор, д.б.н., к.т.н., г. Москва

Кутьков В.А., к.ф.-м.н., в.н.с., г. Москва

Линге И.И., д.т.н., г. Москва

Мартынюк Ю.Н., к.ф.-м.н., г. Москва, Зеленоград

Микляев П.С., профессор РАН, д.г.-м.н., г.н.с., г. Москва

Нурлыбаев К., к.т.н., г.н.с., г. Москва, Зеленоград

Сегаль М.Д., д.т.н., в.н.с., г. Москва

Скоморохов А.О., профессор, д.т.н., г. Обнинск

Jozef Sabol, Professor, Ph.D, D.Sc, Prague

Alexeev Ilya, Ph.D of Physico-mathematical Sciences, St.Petersburg

Bakhur Alexander, G.-M.D., Chief Research Scientist, Moscow

Budyka Alexander, Professor, Ph.M.D., Chief Research Scientist, Moscow

Ermilov Alexey, Ph.D. of Engineering Sciences, Chief Research Scientist, Moscow, Zelenograd

Zhukovsky Mikhail, Professor, D.Sc., Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Ekaterinburg

Ivanov Oleg, D.Sc., Moscow

Kozhemyakin Valery, Ph.D of Engineering Sciences, Minsk

Korenkov Igor, Professor, B.D., Ph.D of Engineering Sciences, Moscow

Kut'kov Vladimir, Ph.D of Physico-mathematical Sciences, Leading Research Scientist, Moscow

Linge Igor, D.Sc., Moscow

Martynyuk Yury, Ph.D of Physico-mathematical Sciences, Moscow

Miklyaev Peter, Professor, G.-M.D., Chief Research Scientist, Moscow

Nurlybaev Kubeyzin, Ph.D, Chief Research Scientist, Moscow, Zelenograd

Segal Mikhail, D.Sc., Leading Researcher, Moscow

Skomorokhov Alexander, Professor, D.Sc., Obninsk

ПОДПИСКА



Варианты оформления подписки:

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА «АНРИ»

Возможно оформление годовой подписки или приобретение любого номера



on-line подписка
www.doza.ru/anry



124460, Москва, а/я 194
УМЦ «Контроль
и безопасность»



anry@doza.ru



+7 (495) 777-13-36

АГЕНТСТВО «УРАЛ-ПРЕСС»



on-line подписка
www.ural-press.ru

АГЕНТСТВО «ДЕЛОВАЯ ПРЕССА»



on-line подписка
www.delpress.ru

Для стран СНГ и Балтии
подписка производится
только по каталогам
агентств

Выпуски журнала
в электронном виде,
начиная с 2003 года,
размещены на сайте
www.elibrary.ru

Правила оформления
статей (для авторов):
[www.doza.ru/files/
pravila.pdf](http://www.doza.ru/files/pravila.pdf);
anry.pro/avtoram

Сетевая версия журнала и подписка
на нее доступны по адресу www.anry.pro



О цифровой интеграции радиационных измерений с данными наземной лазерной съемки

Рассмотрена проблематика применения наземной лазерной съемки для задач обеспечения безопасности объектов использования атомной энергии. Наибольшее внимание уделено вопросам вывода из эксплуатации и контроля объектов размещения радиоактивных отходов (приповерхностные пункты захоронения и пункты консервации особых РАО) на стадиях после закрытия и долговременной выдержки. Показано, что цифровые информационные модели являются наилучшей средой для концентрации всех необходимых для вывода из эксплуатации и обоснования безопасности типов данных. Рассмотрены вопросы сопряжения данных цифровых моделей объектов с данными радиационных обследований и иных изысканий. Предложено применение наземной лазерной съемки совместно с радиационными обследованиями и иными изысканиями с сохранением результатов в формате IFC.

Ключевые слова:

энергоблоки АЭС, объекты ядерного топливного цикла (ЯТЦ), радиоактивные отходы (РАО), пункты консервации особых РАО и пункты захоронения РАО (ПЗРО), наземная лазерная съемка, радиационные измерения, безопасность.

И.И.Линге

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), г. Москва

Технология наземного лазерного сканирования (НЛС) относится к цифровым технологиям, которые качественно изменяют общую картину натуральных данных и методологию изыскательских работ. Рынок наземных лазерных сканеров уже более 15 лет показывает устойчивый рост продаж как в России, так и по всему миру [1]. Технические характеристики сканеров и функции автоматизированной обработки данных съемки постоянно совершенствуются и доходят до показателей точности измерения линейного расстояния в 0,3 мм на 10 м от прибора до точки лазерного отражения (ТЛО). Это обеспечило расширение практики применения НЛС в изыскательских, контрольно-надзорных, аналитических и исследовательских задачах, а также в задачах контроля деформаций как капитальных объектов на каждой стадии жизненного цикла, так и природных объектов (оползни, карьеры) и объектов биосферы.

В отношении объектов использования атомной энергии метод НЛС применяется для актуализации конструкции объекта [2] на основе полученного цифрового образа объекта, подлежащего выводу из эксплуатации (ВЭ), отражающего фактическое состояние объекта – модели облака ТЛО от поверхности объекта ВЭ и его частей. Для многих объектов ВЭ данные НЛС стали основным источником информации для оценки объемов образующихся РАО, разработки и оптимизации проектов ВЭ с применением технологии информационного моделирования (ТИМ). Как отмечается в [3], потенциал применения цифровых технологий в повышении эффективности работ по выводу из эксплуатации и обращению с РАО лежит в процессах проведения и анализа результатов комплексного инженерного и радиационного обследования (КИРО), при оценке объемов образования РАО, проектировании и оптимизации работ по ВЭ, при рассмотрении и согласовании проекта ВЭ и непосредственно при демонтаже объекта ВЭ. Особо перспективными для цифровизации являются процессы извлечения знаний при управлении объектами ВЭ на стадиях жизненного цикла: после окончательного останова, подготовки и реализации дезактивационных работ, проектировании работ по ВЭ, снятии с регулирующего контроля по завершении ВЭ. Цифровизация этих процессов влечет актуализацию методик измерений. Очевидно, что цифровая информационная модель (ЦИМ) должна стать поставщиком информации о состоянии объекта для участников иных процессов и задач, а цифровой формат передачи данных – универсальным поставщиком измерений об объекте (радиационные, георадарные, пространственные геометрические измерения или иные данные).

С учетом изложенного в статье кратко рассмотрено: оборудование и программное обеспечение, необходимое для применения метода НЛС; применение НЛС для задач за-

вершающих стадий жизненного цикла объектов использования атомной энергии; особенности радиационных измерений и иных изысканий в целях обеспечения безопасности и вопросы цифрового сопряжения данных различного рода измерений, в том числе радиационных. Сразу отметим, что имеющийся опыт интеграции данных в рамках ЦИМ, объектов и площадок их размещения пока реализован в упрощенном варианте – путем включения отчетных данных в ЦИМ ручным способом с практической утратой точных данных с погрешностью геопозиционирования порядка 0,1 м. Во многих случаях это обстоятельство препятствует восстановлению объективной картины состояния объекта и его радиационных характеристик и, в конечном итоге, получению реалистичных оценок объемов РАО при выводе из эксплуатации и решению многих других задач.

Особенности применения НЛС

При наземной лазерной съемке осуществляется сканирование пространства вокруг сканера за счет движения прибора (блока лазерного луча) в двух плоскостях (рис.1). Съемка осуществляется путем детектирования отраженного от поверхности объекта лазерного луча (углов поворота сканера и лазерного блока, интенсивности сигнала, времени прохождения). Полученное значение определяет основные характеристики ТЛО: приборные координаты x , y , z , время и интенсивность отправленного и отраженного от поверхности объекта в конкретной точке сигнала лазерного луча. При фотопанорамной съемке эти данные дополняются значением цвета в формате RGB. Съемка данных осуществляется с каждого места установки сканера на местности или в помещении здания (станция сканирования). В среднем во время съемки крупного объекта может потребоваться до 2–3 тысяч станций сканирования. Для площадки ФГУП «РАДОН» в районе Сергиева Посада, например, потребовалось

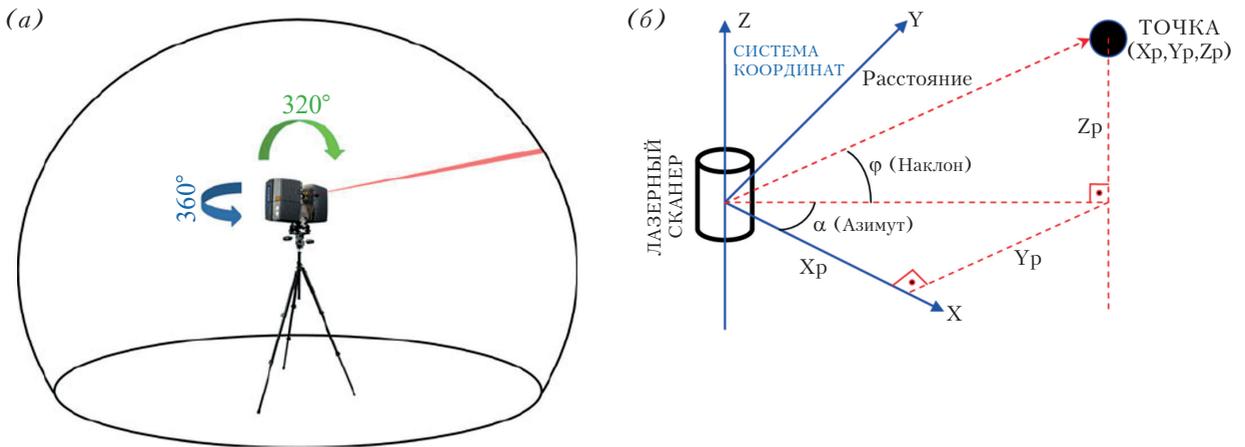


Рис.1. Пространственные измерения наземного лазерного сканера: (а) – рабочие плоскости движения сканера во время работы, (б) – принцип измерения положения точки лазерного отражения в пространстве системы координат сканера.

900 станций, в том числе более 200 в помещениях [4]. При этом топология размещения станций сканирования на открытых площадных объектах схожа с размещением точек радиационного замера при обследованиях. При съемке внутри помещений ситуация более сложная – частота расположения станций сканирования возрастает при наличии оборудования, как зачастую и при проведении основного объема радиационных измерений – площадных измерений мощности дозы и плотности потока частиц.

Для точности НЛС принципиальное значение имеет процедура уравнивания данных НЛС (облаков точек, полученных с разных станций сканирования, рис.1а). Уравнивание может быть выполнено: алгоритмическими методами (ICP-алгоритм [5] и его вариации); по контрольным опорным мишеням (маркам для уравнивания); координатным методом путем приведения совместной съемки координат глобальной навигационной спутниковой системой и НЛС.

Применение методов алгоритмического уравнивания данных НЛС ограничивается только съемкой внутренних помещений и частично фасадов зданий и сооружений. Для качественного выполнения алгоритма (напри-

мер, итеративным алгоритмом ближайшей точки (Iterative closest point)) уравнивания двух облаков точек важен параметр перекрытия облаков точек, то есть в каждом облаке точек должны содержаться стабильные, большие и размещенные в каждой из трех плоскостей ортогональной системы координат области одинаковой поверхности объекта съемки (до 50–70 % от всех ТЛО станции сканирования). Опыт показал, что применения алгоритмического уравнивания для получения единого облака точек крупных промышленных объектов типа здания и сооружения для задач вывода из эксплуатации достаточно. Однако для задач долговременного мониторинга состояния объектов требуется опорная сеть.

Совместная ГНСС и НЛС особо широко применяется для крупных природных и техногенных объектов (горных участков, оползней, карьеров, отвалов и пр.) с целью контроля опасных процессов на кратко- и среднесрочном горизонте. Главным ее достоинством является автоматическое уравнивание всех станций сканирования (более 100 для крупных проектов) по координатам центров станций сканирования, полученных ГНСС-методом непосредственно во время проведения лазерной съемки (рис.2д). Основную погреш-

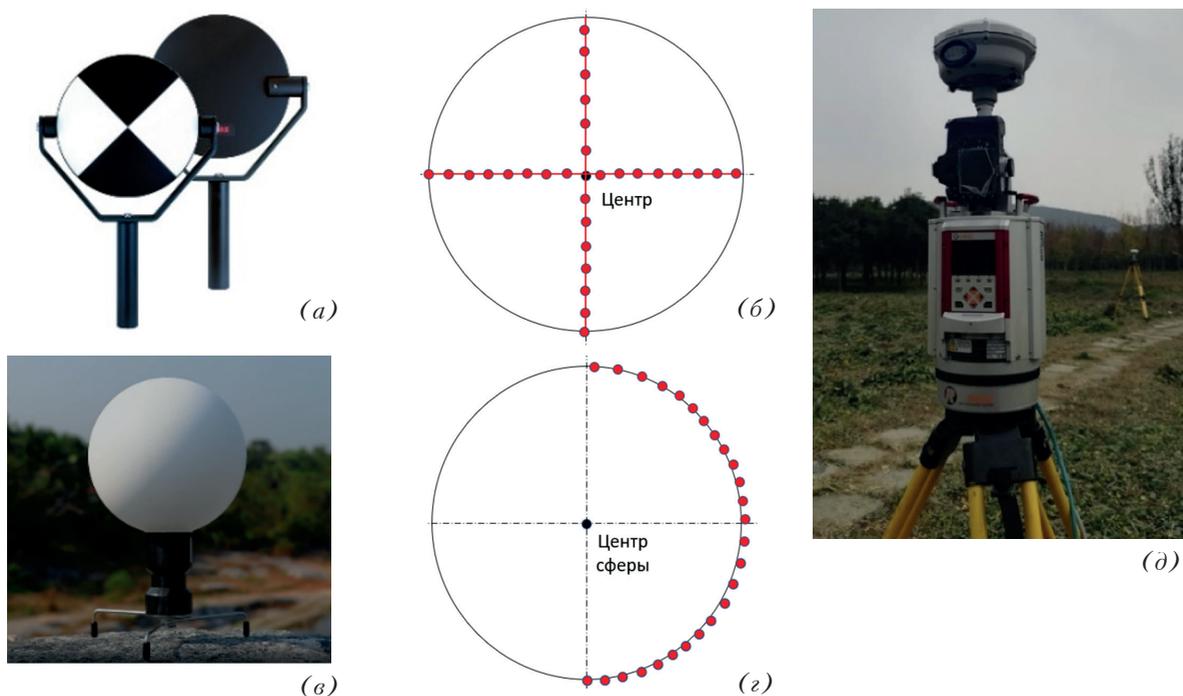


Рис.2. Марки и контрольные точки (центры): (а) – плоская марка, (б) – восстановление точки центра плоской марки (красным – ТЛО), (в) – сферическая марка, (г) – восстановление точки центра сферы (красным – ТЛО), (д) – совмещение ГНСС-приемника на лазерном сканере.

ность в уравнивание вносит, соответственно, погрешность ГНСС-метода. Недостатком метода высокоточной ГНСС-съемки является длительность точного определения координат (до нескольких часов).

Отметим отдельно опыт создания опорной сети для контроля объектов захоронения РАО, в том числе такого сложного объекта, как В-9 [6]. Опыт проведения такого рода классической геодезической съемки говорит о серьезных трудозатратах существующих методов, отсутствии решения по представлению результатов контроля объектов в цифровой форме.

В последние десятилетия получили широкое развитие методы сравнения облаков точек с целью выявления изменений (деформаций поверхности), среди них: трехмерное сопоставление поверхностей методом наименьших квадратов (least squares 3D surface matching, LS3D) развитый в [7] и [8], метод аффинного преобразования двух циклов съемки и его разложении на поступательные и вращательные

движения поверхности [9], алгоритм кусочного выравнивания (piecewise alignment method), основанный на итеративном алгоритме определения ближайшей точки (ICP) для автоматического вычисления поля смещения [10]. В [11] при анализе метода НЛС для контроля деформаций отмечается вопрос строгости и эффективности методов обработки облаков точек для обнаружения изменений и анализа деформации, а также, что НЛС способна обнаруживать деформации в миллиметровом диапазоне. Отмечается перспективность методик, учитывающих классические геодезические методы и НЛС, а также то, что применимость контроля деформаций на основе НЛС требует строгой привязки данных НЛС, три перспективных метода в составе алгоритма сравнения облаков точек – многомасштабное сравнение модели с моделью облака (the Multiscale Model to Model Cloud Comparison, МЗС2), метод кусочного выравнивания и метод точечной оценки от блока к блоку. Определенные коллизии,

связанные с применением алгоритма МЗС2, поясняет рис.3.

Традиционные методы сравнения облаков точек: облако–облако (С2С, рис.3а), облако–модель (С2М, рис.3б) и алгоритм МЗС2 (рис.3в), том числе его вариант МЗС2-PM-алгоритм [12], в котором оцениваются перемещения путем сравнения соответствий в объекте, а не в евклидовом пространстве, что не соответствует нормативному определению горизонтальных и вертикальных деформаций. Эти алгоритмы развиваются, в частности, в работе [13] (2020 г.) предложена новая среда на основе трехмерных векторов смещения (Feature to Feature Supervoxel-based Spatial Smoothing, F2S3, рис.3г). Метод F2S3 чувствителен как к параллельному, так и к ортогональному движению относительно поверхности. Черные стрелки (рис.3г) обозначают предполагаемые векторы смещения. Апробация автоматизированной версии алгоритма показывает достаточно высокую эффективность при обработке больших объемов данных (несколько часов) [14]. Однако полностью корректным подходом сравнения облаков, снимающим неопределенности обработки, является сравнение облаков точек в привязке к опорной системе координат (опорной сети). При этом ключевой характеристикой изменений между облаками точек будут параметры трехмерного тела идентифицируемой деформации покрывающего экрана.

На рис.4 приведен пример сравнения облаков точек для конкретного грунтового могильника с разницей в циклах измерений в 3 года.

По результатам применения алгоритма МЗС2 каждой точке модели присвоены значения рассчитываемого МЗС2-расстояния, отражающего смещение между облаками точек двух циклов съемки по направлению нормали к поверхности. Красные области на рисунке отражают деформации дневной поверхности покрывающего экрана более 5 см, зеленые – отклонения между двумя циклами съемок менее 1 см. Этот же метод применен на данных модельного эксперимента по оценке вертикальных деформаций (рис.5), в рамках которого оценены вертикальные деформации грунта (подъемы и провалы, № 1, 4, 7, рис.4) и алгоритм идентификации такого рода деформации. Как показывают результаты эксперимента, изменения грунта более 5 см (подъемы и провалы) однозначно идентифицируются по данным НЛС (№ 3, 6, 9 рис.4). При этом граница области деформации формально может быть определена по ТЛО, но на практике требует расширения до 5 см вокруг подъема или провала ввиду неоднородной структуры поверхности в данных НЛС. Подобное предположение для грунтовых поверхностей не мешает решению практических задач определения деформаций.

Опыт полевых работ по наземной лазерной съемке сканером Leica RTC360 показал, что установка сканера на высоте 1,6–2,0 м обеспечивает стандартные потребности в съемке с расстоянием между станциями 20–30 м для съемки фасадов зданий и сооружений. Для обеспечения качественного угла покрытия применяют различной высоты штативы и мачты,

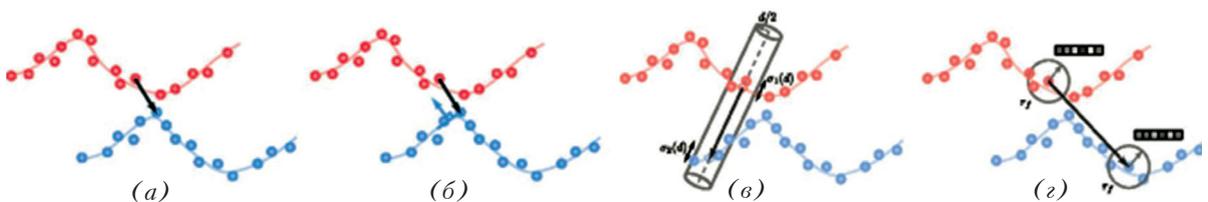


Рис.3. Методы сравнения облаков точек: (а) – облако–облако (С2С), (б) – облако–модель (С2М), (в) – многомасштабное сравнение облаков от модели к модели (multiscale model-to-model cloud comparison, МЗС2 [12]), (г) – функция пространственного сглаживания на основе супервокселей (F2S3). Синим цветом – смещенное облако точек, красным – точки нулевого цикла съемки.

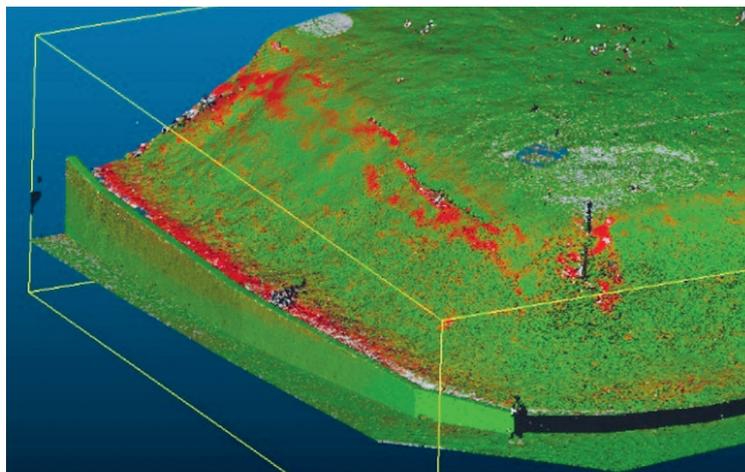


Рис.4. Пример сравнения дневной поверхности покрывающего барьера ПХ РАО методом МЗС2.

подбирая оптимальную высоту и соотношение угла падения лазерного луча на рабочую поверхность съемки. Для обеспечения уравнивания данных с различных мест сканирования применяются чаще плоские марки для уравнивания. Для привязки к опорной сети рациональнее использовать стационарные точки опорной сети. В работах со сканером принимает участие небольшая команда (от 1 до 3 человек в зависимости от объема съемки и применения марок для уравнивания или дополнительных геодезических привязок).

предварительная фильтрация ТЛО, распознавание образа ТЛО марок для уравнивания, определение точки центра марки, уравнивание облаков точек, преобразование координат (приведение к системе координат опорной сети), фильтрация ТЛО (устранение ТЛО шума, обрезка файла проекта облака точек). В отношении инструментов стоит отметить высокую долю импортного ПО [15] для автоматизации операций камеральной обработки данных НЛС. Ряд программных библиотек (PointNet++, PCL, Open3D, PyMeshLab,

Время может быть оценено от 2 до 10 минут на съемку с одного места сканирования (одна станция сканирования) в зависимости от сложности установки станции и условий для уравнивания результатов съемки и иных обеспечивающих мер.

Последующая камеральная обработка включает такие операции, как импорт и конвертирование данных из приборного формата данных НЛС,

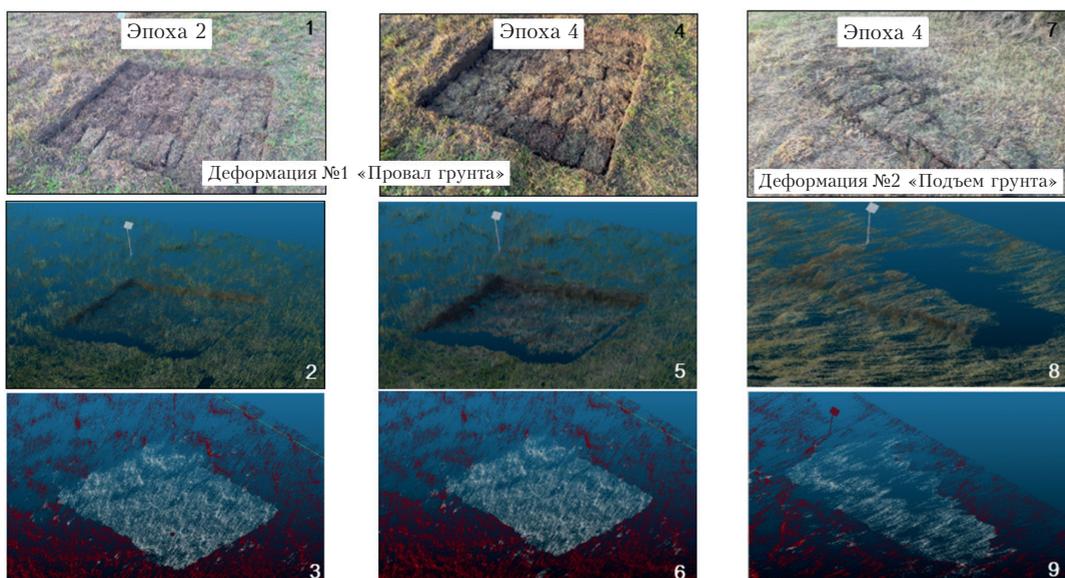


Рис.5. Идентификация вертикальных деформаций грунта МЗС2-алгоритмом по данным НЛС.

TensorFlow и PyTorch и пр.) позволяет автоматизировать специальные задачи обработки данных.

В отношении контроля деформации дневной поверхности ПЗРО по данным НЛС оценка точности проводимых измерений включает в себя оценку погрешности Методики съемки, оценку погрешности измерения линейных параметров деформаций по модели облака точек, оценку стабильности опорной сети. Работы по развитию математического обоснования оценки точности НЛС [16,17] и погрешности съемки современных моделей сканеров (Leica RTC360, P50, FARO FOCUS 3D X330, VZ-440i, Z+F 5016i) [18] периодически актуализируются.

Сегодня можно констатировать, что для задач актуализации пространственных характеристик объекта, необходимых при разработке проекта ВЭ и в работах по ВЭ, состояние приборной базы НЛС и существующего ПО для обработки данных НЛС может быть охарактеризовано как развитое на высоком уровне. Методы сравнения результатов НЛС-съемки различных циклов съемки (облака точек различных временных периодов) с целью идентификации и классификации выявленных деформаций могут быть охарактеризованы как развивающиеся высокими темпами и могут быть автоматизированы.

Применение наземной лазерной съемки для задач вывода из эксплуатации и контроля состояния пунктов хранения РАО

В России применение наземной лазерной съемки для задач вывода из эксплуатации началось более 15 лет назад, прежде всего на энергоблоках АЭС [19]. Первые задачи, на которые было ориентировано применение НЛС – учет отличий фактически существующих сооружений и установленного оборудования от предусмотренных проектом решений (план/факт анализ) при создании цифровых моделей энергоблоков. На основе этих цифро-

вых моделей последовал первый опыт применения технологий информационного моделирования, в том числе для задач отработки монтажа графитовой кладки, подготовки персонала и ряда других [20]. В силу ряда обстоятельств, среди которых обилие данных по радиационным характеристикам, наличие большой доли короткоживущих радионуклидов, а для многих энергоблоков и продолжение эксплуатации, задача цифровизации данных о радиационных характеристиках, в том числе из состава КИРО, для энергоблоков АЭС не определялась как наиболее актуальная.

Принципиально иная ситуация с выводом из эксплуатации объектов ядерного топливного цикла. Работы по созданию цифровых информационных моделей объектов ЯТЦ были начаты в 2018 году, в том числе с участием автора [4,21]. К настоящему времени созданы ЦИМ более 120 объектов различных типов (производство ядерного топлива, радиохимические производства, исследовательские установки, пункты хранения РАО различных типов и т. д.), проанализированы десятки отчетов о проведении КИРО с включением данных в ЦИМ, применены методы геостатистики для определения дефицитов радиационных измерений, выполнены предпроектные оценки объемов и классов РАО от вывода из эксплуатации [22]. К принципиальным особенностям этих работ относится тот факт, что для объектов, созданных 50 и более лет тому назад с утраченной на момент ВЭ первичной проектной документацией, лазерное сканирование стало практически основным инструментом создания ЦИМ объектов и проектирования работ по демонтажу. Создание цифровой информационно-радиационной модели объекта на основе данных КИРО – это несовершенный способ интеграции и анализа необходимых для разработки проекта ВЭ данных, поскольку основной способ привязки данных ради-

ационных измерений – это принципиальная схема обследования с погрешностями метрового порядка. По итогам рассмотрения этих работ на заседании НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» (октябрь 2023 г.) и стратегической сессии по выводу из эксплуатации в Санкт-Петербурге (декабрь 2023 г.) были сделаны выводы о первоочередности перехода к цифровому КИРО как ключевому условию разработки эффективного проекта ВЭ. По сути, речь идет о повышении точности основного объема радиационных измерений на порядок.

Еще одним перспективным применением НЛС является контроль стабильности покрывающих экранов приповерхностных пунктов захоронения РАО после их закрытия, а также пунктов консервации особых РАО на этапе их долговременной выдержки до преобразования в пункты захоронения. Действующая нормативная база в области требований по контролю после закрытия ПЗРО содержит много указаний на его необходимость. В том числе статьей 13 Федерального закона от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» предусмотрено новое понятие «периодического радиационного контроля» на территории размещения такого пункта захоронения после его закрытия, который должен быть предусмотрен проектом пункта захоронения РАО. Очевидно, что контроль целостности покрывающих барьеров определяет, что по отношению к ПЗРО могут иметь место только неразрушающие методы контроля. В данной статье автор предлагает подходы к организации одновременных или сопряженных иными способами обследований, включающих лазерную съемку, радиационные измерения и иные методы изысканий покрывающих экранов пунктов хранения РАО.

Таким образом, задачи ВЭ и контроля барьеров безопасности пунктов консервации

и захоронения РАО определили запрос на формирование и последующее применение интегрированных пространственных данных, включающих пространственную модель объекта или его части с данными радиационного и иных обследований и изысканий. Очевидно, что такие пространственные данные должны поставляться заинтересованным участникам ЖЦ объекта в рамках технологии информационного моделирования. Различные методы получения пространственных данных могут предусматривать как приборно-программные средства для интеграции данных радиационных измерений с данными лазерного сканирования, так и иные методы сопряжения для применения различных методов обработки и представления данных. Отметим, что задачи информационной поддержки ВЭ (проектирования и собственно работ по ВЭ) и долговременного контроля принципиально отличаются. В первом случае речь идет об интеграции и обобщении данных для решения разовой задачи, но с широким полем задач цифровизации [3]. При этом точное позиционирование результатов измерений является вспомогательной задачей, уточняющей оценку объемов РАО. Во втором случае – о выявлении нарушений стабильности системы барьеров с последующим анализом возможных причин их возникновения и оценкой долговременных последствий, которые возможны только в случае сопоставимости измерений в одной и той же точке. По этой причине НЛС как способ детального описания поверхностей покрывающих экранов пункта захоронения не имеет конкурентов.

Комплексные инженерно-радиационные обследования

При проведении радиационных измерений ориентируются, как правило, на три методических документа [22–24], в которых не содержится требований к точности позициониро-

вания радиационных измерений. В качестве средств измерения часто используется дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоками детектирования БДКГ-03, БДПА-01, БДПБ-01, которые имеют примерно одинаковые массогабаритные характеристики: диаметр до 80 мм, высота до 300 мм, вес до 0,6 кг каждый. Производители приборов отмечают наличие интеллектуального блока детектирования бета-излучения БДПБ-01, который может входить в комплект поставки дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М, а также работать автономно в реальном режиме времени путем подключения через кабель к ПЭВМ. Применение дозиметрических приборов со встроенными устройствами геопозиционирования на основе глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) и/или системы позиционирования (GPS) принципиально не меняет ситуации, поскольку точность оперативного определения местоположения лежит в диапазоне 3–4 метров [25], что недостаточно для многих практических приложений.

Размещение точек радиационных замеров близко к схемам, применяемым при НЛС. Наиболее простым способом интеграции данных радиационных измерений и лазерного сканирования является непосредственное проведение радиационных замеров в точках станций сканирования с помощью дополнительной консоли на геодезической треноге для установки или позиционирования дозиметрических приборов. В этом случае будут полностью исключены погрешности координатной привязки замеров, упростится привязка дополнительных замеров, в том числе по контролю наличия снимаемого радиоактивного загрязнения методом снятия мазков с обследуемых поверхностей и взятия проб материалов стен и пола и многие другие. Последующая интеграция данных радиационных измерений в ЦИМ в этом случае не составит проблем, а оценка площадных и объемных характеристик РАО

будет избавлена от неопределенностей квадратичного характера.

Актуальна интеграция в ЦИМ данных НЛС и иных видов изысканий, проводимых в рамках КИРО. В особой мере это касается неразрушающих методов контроля, которые позволяют судить о распространении ареала загрязнения на значительных глубинах по косвенным показателям на расстоянии. В этом случае только сопоставление данных измерений за различные периоды, но выполненных в фиксированных точках, может дать объективную информацию о развитии негативных процессов. Так, например, применяемый в практике обследования бассейнов-хранилищ РАО метод радиоэлектронного зондирования (георадарного обследования) позволяет получить зависимости удельного электрического сопротивления (УЭС) в экране и подэкранной толще на глубинах до 20–30 метров. При разовом обследовании этот метод дает качественную картину состояния объекта. Сравнение данных различных циклов такой съемки возможно по двум вариантам: (1) путем сравнения рядов функции УЭС различных циклов наблюдения, взятых в одной точке зондирования, (2) путем импорта результатов георадарной съемки в среду моделирования, например, в цифровую информационную модель и сравнения соответствующих элементов уже в модели. Очевидно, что, по крайней мере, сравнение рядов функции УЭС сильно зависит от однозначного взаимного сопоставления точек зондирования. Обеспечение точной привязки точек зондирования мало встречается в работах по георадарному мониторингу.

Наличие ЦИМ результатов изысканий открывает широкие возможности оценки и прогнозирования состояния объекта, которые становятся еще более практически значимыми за счет интеграции данных иных инженерных изысканий и применения специальных методов анализа, в том числе с применением

нейронных и иных систем распознавания образов. В качестве примера можно привести работу [26] по решению задачи представления результатов георадарной съемки в составе ЦИМ. Предлагаемый автором подход к увязке данных георадара и ЦИМ основан на распознавании образов объекта с применением нейронной сети Faster R-CNN и последующей локализацией данных обработки в 3D-модели. Основной вывод [26] заключается в том, что предложенный метод может точно преобразовывать арматурные стержни из данных георадара в соответствующие элементы ЦИМ. По мнению автора, вполне правомерно выставить гипотезу о реализуемости аналогичного метода моделирования границ инженерных барьеров безопасности в составе ЦИМ по данным анализа циклов УЭС.

О периодическом радиационном контроле пунктов консервации и пунктов захоронения РАО

Предпосылкой данной работы является принцип контроля пунктов консервации и ПХ захоронения РАО после их закрытия. С учетом предполагаемой эволюции ПЗ РАО оптимальным представляется осуществлять контроль радиационных характеристик и целостность инженерных барьеров как в части дневной поверхности, так и скрытых (подземных) элементов системы инженерных барьеров безопасности. Для осуществления такого контроля определены такие технологии изысканий как наземное лазерное сканирование и георадарная съемка. Автором настоящей статьи предложен метод комбинированной НЛС и сбора радиационных характеристик ПЗ РАО (далее – Метод комбинированной съемки). Применение такого метода позволит оптимизировать объем натурных работ, проводимых с периодичностью в 5–10 лет, и обеспечит интеграцию данных. При наличии признаков изменения покрывающих экранов или установ-

ления фактов появления значимых деформаций последующие циклы обследований сопровождаются в местах локализации деформаций дополнительной георадарной и/или радиоэлектромагнитной съемкой. По итогам очередного обследования методом комбинированной съемки предполагается заключение, в котором фиксируется: стабильность внешних поверхностей покрывающих экранов и параметры радиационной обстановки на объекте; наличие незначительных изменений с рекомендацией на последующих циклах съемки дополнительных изысканий; наличие деформаций покрывающих экранов, требующих углубленного анализа. В настоящее время методика разработана и проходит апробацию.

Комбинированная методика наземной лазерной съемки и радиационного оборудования

Методика комбинированной съемки направлена, во-первых, на проведение радиационных измерений приповерхностных пунктов хранения РАО или ПЗРО в привязке к пространственным данным, а, во-вторых, на контроль деформаций дневной поверхности. Развитие Методики может быть продолжено за счет включения данных георадарной съемки.

Методика предусматривает выполнение следующих работ по объекту:

- определение границ участка объекта для проведения наземной лазерной съемки;
- создание опорной сети (ОС) для контроля деформаций объекта, включая назначение класса точности определения деформаций и закладку пунктов ОС вокруг участка съемки;
- выполнение подготовительных работ по НЛС на объекте, включая расчет измерительного объема НЛС, разработку программы и плана НЛС, проверку исполнения требований ФНП по отсутствию растительности (НП-069-14, раздел 2, пункты 23, 70);

- проведение цикла радиационных измерений и НЛС дневной поверхности объекта;
- определение деформаций объекта по результатам сопоставления текущего состояния дневной поверхности с различными циклами съемки;
- формирование заключения по оценке состояния инженерного барьера безопасности (покрывающего экрана) с установлением фактов: отсутствия изменений; наличия деформаций (изменений), не существенных для безопасности, но требующих внимания на последующих циклах съемки; значимых для безопасности деформации, требующих углубленного анализа и, при необходимости, корректирующих мер.

Создание и сопровождение опорной сети для контроля деформаций дневной поверхности ПЗРО, а также проверка ее стабильности осуществляется на основе существующих нормативных требований и классических задач (например, ГНСС-съемкой).

Непосредственно метод комбинирования радиационных измерений и данных НЛС заключается в геопривязке данных замеров (маршрута радиационного обследования – последовательности точек замера) к пространственной модели объекта (облака точек дневной поверхности ПЗРО), получаемого методом НЛС. Отметим, что потребность в размещении точек радиационного замера на дневной поверхности ПЗРО примерно уместается в расстояния между станциями сканирования НЛС (15–20 м), в свою очередь, определяемыми из методических требований к точности уравнивания облаков точек. Для задач контроля радиационного состояния объекта этих расстояний необходимо и достаточно. Это означает, что оптимально соединить геопозиционирование станции сканирования и точки замера. Рекомендациями к методу геопривязки

радиационных замеров могут быть: во-первых, мобильное крепление радиационного детектора на штатив лазерного сканера во время съемки на каждой станции сканирования, во-вторых, вынос в натуру временных идентификационных знаков для привязки точки замера или привязка маршрута (пути) радиационных замеров к опорным пунктам и соответственно конвертация координат точек замера в систему координат опорной сети контроля деформаций. Реализация этих методов не требует особых экономических затрат и может быть осуществлена в современном ПО для обработки данных НЛС, геодезических изысканий, систем автоматизированного проектирования, или информационного моделирования, или автоматизировано программным способом самостоятельно.

Методы определения деформаций двух циклов съемки, определенные в Методике, основываются на визуальном анализе облаков точек, кластеризации ТЛО по интенсивности, алгоритмах расчета расстояния между облаками точек (МЗС2 и F2S3). По результатам расчета расстояний между облаками точек осуществляется кластеризация ТЛО деформаций, создание простых моделей деформации дневной поверхности покрывающего экрана ПЗРО и вычисление параметров деформаций и импорт в формат цифровой информационной модели (IFC) упрощенной модели деформации с сохранением параметров деформаций и точек радиационного контроля.

Таким образом, Методика обеспечивает, во-первых, единую модель данных по радиационному контролю, состоянию покрывающего экрана ПЗРО и проекта ПЗРО в составе цифровой информационной модели и, во-вторых, оптимизацию полевых работ по радиационному обследованию и контролю деформации покрывающего экрана.

Заключение

Создание ЦИМ объектов для целей вывода из эксплуатации или контроля ПЗРО после закрытия с включением в них данных НЛС принципиально расширяет возможности анализа и поиска эффективных решений по обоснованию безопасности.

Включение в ЦИМ данных радиационных обследований до последнего времени осуществлялось на основе отчетных материалов, в которых данные по геопривязке точки радиационного замера содержали погрешность до 0,5–1 м, что приводило к существенным потерям (из-за отсутствия точной координатной привязки измерений) при сравнении различных временных интервалов и оптимизации проектов вывода из эксплуатации. Постановка задачи о переходе к цифровому КИРО поддержана на уровне отрасли и начинает реализовываться.

Основной вопрос, который предстоит решить при переходе к цифровому КИРО, – это цифровая интеграция данных радиационных измерений с основным источником информации по геопространственным данным описа-

ния объекта. Автором рассмотрен подход по комбинированному радиационному обследованию и наземной лазерной съемке. Определено основное содержание методики контроля покрывающих экранов барьеров безопасности пунктов хранения РАО после закрытия и консервации для их периодического радиационного контроля.

Особенностью представленного в Методике подхода является импорт результатов комбинированной съемки в цифровую информационную модель объекта с включением данных по геопозиционированию радиационных измерений на основе НЛС. Это обеспечивает единство подхода к хранению и представлению данных, обработки и возможности проведения измерений на основе ранее созданных ЦИМ.

При проведении контроля за состоянием объектов, в том числе пунктов захоронения РАО, требования к координатной привязке результатов радиационных измерений и иных изысканий должны составлять не более 50–100 мм. Предложенная Методика комбинированной съемки позволяет такую точность обеспечить.

Литература

1. Global Terrestrial LiDAR Market Size, Share, Trends, Industry Growth by Component (GPS, Navigation (IMU), Laser Scanner, Others), by Application (Corridor Mapping, Engineering, Environment, Exploration, ADAS, Others), by End-Use, by Region, and Forecast to 2030, Report ID: RC156440.
2. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Вывод из эксплуатации. Под общей редакцией Большова Л.А., Лаверова Н.П., Линге И.И. М., 2015. 316 с. Т.3.
3. Иванов А.Ю., Линге Ин.И. К вопросам цифровизации при обращении с радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы. 2022. № 4(21). С. 39-47. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-39-47.
4. Лужецкий А.В., Невров Ю.В., Ведерникова М.В., Иванов А.Ю., Линге Ин.И., Неуважаев Г.Д., Савельева Е.А., Шпиньков В.И., Понизов А.В. О создании интегральной информационной модели для определения стратегии развития промышленного комплекса по обращению с радиоактивными отходами ФГУП «РАДОН» // Радиоактивные отходы. 2020. № 1(10). С. 101-112. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-101-112.
5. B. Paul, N. McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, April 1992, Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering, no. 14(3), pp. 239-256. DOI: 10.1117/12.57955, дата: 1992/04/30, 1992.
6. Мокров Ю.Г., Алексахин А.И. Мониторинг – основа обеспечения безопасности при выполнении работ по консервации водоема Карачай // Радиоактивные отходы. 2018. № 3(4). С. 60-68.

7. A. Gruen, D. Akca, «Least squares 3D surface and curve matching», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, № 59(3), pp. 151-174, 2005.
8. O. Monserrat, M. Crosetto. «Institute of Geomatics, Barcelona, Spain, Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, № 63, pp. 142-154, January 2008. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.07.0082008>.
9. Oppikofer T., «Detection, analysis and monitoring of slope movements by high-resolution digital elevation models». PhD Thesis, Institute of Geomatics and Analysis of Risks, Faculty of Geosciences and Environment, University of Lausanne, Switzerland, 2009.
10. G. Teza, A. Galgaro, N. Zaltron, R. Genevois, «Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, pp. 3425-3446, 2007.
11. W. Mukupa, G.W. Roberts, C.M. Hancock, K. Al-Manasir, «A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures», *Survey Review*, DOI: 10.1080/00396265.2015.1133039, 2016.
12. Mike R. James, Stuart Robson, Mark W. Smith, «3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys», *Earth surface processes and landforms*, № 42(12), pp. 1769-1788, 2017. DOI: 10.1002/esp.4125.
13. Gojic Z., Zhou C., Wieser A. «Robust pointwise correspondences for point cloud based deformation monitoring of natural scenes», 4th Joint international symposium on deformation monitoring (JISDM), 2019.
14. Z. Gojic, L. Schmid, A. Wieser, «Dense 3D displacement vector fields for point cloud-based landslide monitoring», *Landslides*, pp. 18:3821-3832. DOI: 10.1007/s10346-021-01761-y.
15. Медведев В.И., Райкова Л.С. Программы для обработки данных лазерного сканирования местности. DOI: 10.17273/CADGIS.2017.2.2, 2017.
16. T.P. Kersten, M. Lindstaedt, «Geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanner systems in the laboratory and in the field», *Applied Geomatics*, 14:421-434, URL: <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00442-2>, 2022.
17. Surface related uncertainties of laser scanning: a simulation-based and experimental study, a thesis submitted to attain the degree of Doctor of Sciences of ETH Zurich (Dr. sc. ETH Zurich). Sukant Chaudhry M.Sc. Physics, diss. eth no. 27989. DOI: 10.3929/ethz-b-000533401.
18. E. Serantoni, «Integrated structural monitoring using point clouds obtained from terrestrial laser scanning», A dissertation submitted to attain the degree of doctor of sciences of ETH Zurich, ETH Zurich, diss. eth no. 26773. URL: <https://gseg.igp.ethz.ch/research0/current-phd-topics0/completed-dissertations.html>, 2020.
19. Былкин Б.К., Бунто П.А., Тихоновский В.Л., Чуйко Д.В. Применение имитационно-обучающего тренажера для демонтажа блоков АЭС // Атомная энергия. 2012. Т. 113. № 6. С. 333-336. 2012.
20. Александрова Т.А., Иванов А.Ю., Линге Ин.И., Лунов Д.М., Савельева Е.А., Самойлов А.А., Уткин В.Б. Оценка объемов образования РАО от вывода из эксплуатации с использованием информационных моделей // Радиоактивные отходы. 2020. № 3(12). С. 19-31. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-19-31.
21. Ильясов Д.Ф., Иванов А.Ю. Экономика и цифровизация вывода из эксплуатации объектов ядерного наследия: монография. М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2024. 219 с., ISBN 978-5-7307-2149-4.
22. МУ 2.6.5.008-2016. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Контроль радиационной обстановки. Общие требования. Методические указания.
23. МУ 2.6.5.032-2017. Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей.

24. МУ 2.6.1.2838-11. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности. Методические указания.
25. Скрышник О.Н., Арефьев Р.А., Арефьева Н.Г. Оценка характеристик погрешностей позиционирования комбинированных ГЛОНАСС/GPS приемников // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 10-2. С. 296-301.
26. Z. Xiang, Ge Ou, Abbas Rashidi, «Automated Translation of Rebar Information from GPR Data into As-Built BIM: A Deep Learning-based Approach», ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering, URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.15448>, 28 oct 2021, 2021.

On the Digital Integration of Radiation Measurements with Terrestrial Laser Scanning Survey Data

Linge Innokentiy (Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (NSI RAS), Moscow, Russia)

Abstract. The problems of using terrestrial laser scanning imaging for the tasks of ensuring the safety of nuclear energy facilities are considered. The greatest attention is paid to the issues of decommissioning and control of facilities for the disposal of radioactive waste (near-surface burial sites and conservation sites for special radioactive waste) at the stages after closure and long-term exposure. It is shown that digital information models are the best environment for the concentration of all data types necessary for decommissioning and justification of safety. The issues of interfacing data from digital models of objects with data from radiation surveys and other surveys are considered. The use of terrestrial laser scanning imaging in conjunction with radiation studies and other surveys with the preservation of results in the IFC format is proposed.

Keywords: nuclear power plants, nuclear fuel cycle facilities (NFC), radioactive waste (RW), special RW conservation and RW disposal facilities (RW disposal sites), ground-based laser imaging, radiation measurements, safety.

И.И.Линге (вед.спец.)

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), г. Москва

Контакты: +7 (495) 276-20-00, iil@ibrae.ac.ru.

Твердотельные детекторы оптических сигналов и радиации

Часть 2.2. Показатели качества детекторов

В продолжение второй части обзора твердотельных детекторов рассматриваются обобщенные критерии и показатели качества детектирования, а также конкурентность разных типов детекторов на основе этих показателей. В обзоре сделаны акценты на вероятностное описание случайных процессов формирования сигнала и шума детектирования в твердотельных детекторах малофотонных оптических сигналов и радиации с лавинным умножением.

Ключевые слова:

фотодиод, лавинный фотодиод, кремниевый фотоумножитель, отношение сигнал/шум, разрешение, шум-фактор, порог чувствительности, квантовая эффективность детектирования.

С.Л.Виноградов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
г. Москва
НПП «Доза», г. Зеленоград

О показателях качества детекторов
Показатели качества и критерии эффективности детектирования сигнала какими-либо датчиками, сенсорами, приемниками и детекторами так же разнообразны, как и задачи детектирования с точки зрения выделения полезной информации из регистрируемого сигнала. В зарубежной технической литературе для них употребляют термин «figures of merit» (FOM).

Показатели качества используются в основном для сравнения разных детекторов по эффективности, чувствительности, точности, производительности и другим важнейшим результатам детектирования. В разных прикладных областях для адекватного отображения результатов детектирования в качестве FOM могут быть выбраны самые разные параметры и характеристики детектора (определения терминов «параметр» и «характеристика» рассма-

тривалось в Части 2.1 обзора), а также их функциональные сочетания. Например, в обзорной статье «Как характеризовать показатели качества матричных фотодетекторов» [22], в качестве FOM обсуждаются темновой ток, ампер-ваттная чувствительность, порог чувствительности, удельная обнаружительная способность, полоса частот и времена роста и спада фотосигнала.

В нашем обзоре рассматриваются показатели качества, которые наиболее точно отражают цели и результаты детектирования импульсных оптических сигналов, а также частиц высоких энергий и радиационных потоков (через их конверсию в световую вспышку в сцинтилляторах или черенковских радиаторах). Эти показатели неразрывно связаны с вероятностными процессами детектирования и их ключевыми параметрами и характеристиками, которые были представлены в Части 2.1 обзора. Рассматривается формирование и применение универсального показателя качества в этой прикладной области – общей квантовой эффективности детектирования (detective quantum efficiency, *DQE*).

Отношение сигнала к шуму и разрешение сигнала

Одним из наиболее важных и широко используемых показателей качества детектирования сигналов является отношение сигнала к шуму (signal-to-noise ratio, *SNR*). Также широко применяется обратное к *SNR* отношение шума к сигналу, для которого используют как термин разрешение (resolution, *RES*), так и термины коэффициент вариации или относительное стандартное отклонение. Детектирование импульсов света является случайным процессом, в котором случайное число фотонов *N*, падающих на фотоприемник, преобразуется в случайное число электронов *K* на выходе фотоприемника или электронной схемы считывания. При измерениях выходного сигнала в качестве меры сигнала используют его среднее значение $\mu(K)$. В качестве меры шума используют как среднеквадратичное отклонение $\sigma(K)$, так и ширину на половине высоты гистограммы случайных значений сигнала (full width at half maximum, *FWHM*). Соответственно, значения *SNR* и *RES* могут быть заданы как в единицах СКО, так и в единицах *FWHM*:

$$SNR_{\sigma}(K) = \frac{E(K)}{\sqrt{Var(K)}} = \frac{\mu(K)}{\sigma(K)}; \quad RES_{\sigma}(K) = \frac{1}{SNR(K)} = \frac{\sigma(K)}{\mu(K)}. \quad (1)$$

$$SNR_{FWHM}(K) = \frac{E(K)}{FWHM(K)} = \frac{\mu(K)}{FWHM(K)}; \quad RES_{FWHM}(K) = \frac{FWHM(K)}{\mu(K)}. \quad (2)$$

В случае нормального распределения случайной величины *K*, что достаточно часто бывает в экспериментах, $FWHM(K) \cong 2,354 \cdot \sigma$. Далее в качестве меры шума случайной величины *K* будут использоваться СКО $\sigma(K)$ и соответствующие выражения (1) для *SNR* и *RES*, опуская индекс σ .

Схема вероятностного распределения выходного сигнала и шума представлена на рис.1.

При описании процесса детектирования нужно учитывать не только аддитивные шумы, как представлено на рис.1, но и мультипликативные шумы внутренних процессов преобразования входного сигнала. Рассмотрим общий случай линейного преобразования случайной величины со случайным коэффициентом умножения.

Для анализа изменения разрешения сигнала от входа к выходу детектора применяется теорема Берджеса о дисперсии [6], и случайный процесс преобразования часто описывается как усиление электронов со случайным коэффициентом *M* [5]. При расчете математического ожидания и дисперсии выходной случайной величины *K* по их известным значениям для входной случайной

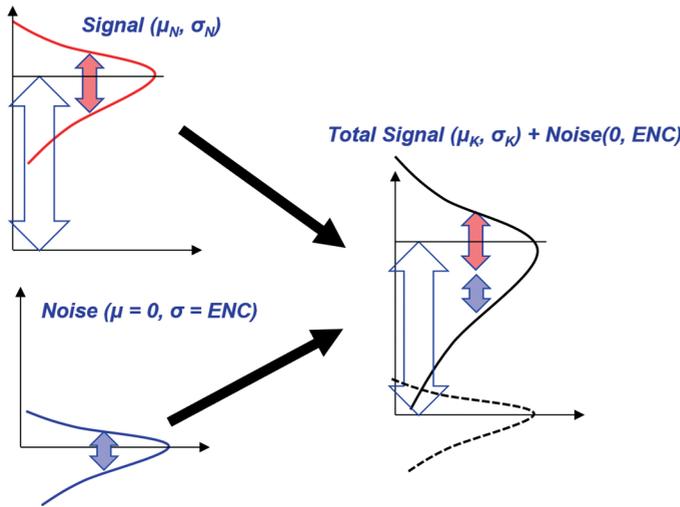


Рис.1. Схема вероятностного распределения выходного сигнала и шума.

величины N предполагается, что каждый процесс усиления независим от других, и известны математическое ожидание и дисперсия выходной случайной величины M при детерминированном числе электронов на входе (как правило, при $N = 1$, т. е. для одиночного электрона):

$$E[N \equiv I] = I; \text{Var}[N \equiv I] = 0; E[M|I] = \mu_M; \text{Var}[M|I] = \sigma_M^2. \quad (3)$$

По определению фактор избыточного шума (excess noise factor, ENF) умножения одиночного электрона в этом случае равен:

$$ENF[M|I] = 1 + \frac{\sigma_M^2}{\mu_M^2}. \quad (4)$$

ENF , заданный (4), является широко используемой мерой «шумности» процесса умножения единичного электрона в ЛФД и ФЭУ, как уже рассматривалось в Части 2.1. Согласно теореме Берджеса, N электронов на входе процесса с известными математическим ожиданием и дисперсией вида (5):

$$E[N] = \mu_N, \text{Var}[N] = \sigma_N^2 \quad (5)$$

порождают K электронов на выходе процесса с математическим ожиданием и дисперсией вида (6):

$$E[K|N] = \mu_M \cdot \mu_N, \text{Var}[K|N] = \mu_M^2 \cdot \sigma_N^2 + \mu_N \cdot \sigma_M^2. \quad (6)$$

Для определения избыточного шума процесса умножения случайного числа электронов N необходимо рассмотреть другое определение ENF , обычно используемое в электронике для анализа шумности усилителя, которое учитывает шум на входе усилителя – дисперсию числа N :

$$ENF[K|N] = \frac{RES(K)^2}{RES(N)^2} = \frac{\frac{\sigma_K^2}{\mu_K^2}}{\frac{\sigma_N^2}{\mu_N^2}}. \quad (7)$$

Применяя результаты (6) к (7), получаем ENF всего процесса:

$$ENF[K|N] = 1 + \frac{\sigma_M^2}{\mu_M^2} \cdot \frac{1}{Fano[N]}, \text{Fano}[N] = \frac{\sigma_N^2}{\mu_N}, \quad (8)$$

где $Fano[N]$ – фактор Фано случайной величины N . Для случайных величин с распределением Пуассона фактор Фано равен 1.

Выражение (8) означает, что ENF процесса умножения N электронов с распределением, отличным от распределения Пуассона, отличается относительно ENF процесса умножения одиночного электрона, но для входного сигнала с пуассоновской статистикой ENF по выражениям (4) и (8) совпадают:

$$ENF[K|N] \Big|_{Fano[N]=1} = ENF[M|I]. \quad (9)$$

В большинстве практических случаев число фотонов в импульсе, а также в некотором интервале времени имеет распределение Пуассона.

Выражения (8) и (9) позволяют комбинировать результаты поэтапных процессов преобразований как произведение специфических ENF каждого процесса, приводящих к ухудшению разрешения на каждом этапе преобразования, и может быть дополнительно упрощено, если фактор Фано для некоторого конкретного процесса равен или близок к 1:

$$RES(K) = RES(N) \cdot \sqrt{EVF_{process1} \cdot ENF_{process2} \dots} = RES(N) \cdot \sqrt{EVF_{total}}. \quad (10)$$

Таким образом, результаты детектирования сигнала определяются общим шум-фактором процесса детектирования ENF_{total} , и на этой основе может быть построен анализ качества детектирования по критерию разрешения числа фотонов по выражению (10).

Схема поэтапного преобразования вероятностного распределения и разрешения сигнала от входа к выходу представлена на рис.2.

В общем шум-факторе ENF_{total} учитываются вклады всех ключевых процессов детектирования: фотоэлектрического эффекта преобразования фотонов в электроны, темновой генерации электронов, шума умножения электронов, коррелированных эффектов (кроссток, послеимпульсы), а также от нелинейности преобразования входного сигнала в выходной сигнал, как рассматривается в работах [2,3,16,17,18,23]. Сводная таблица результатов этих работ в части специфических шум-факторов указанных процессов представлена в табл.1.

Итак, с учетом шума электронной схемы регистрации, выраженном в единицах СКО шума – эквивалентного шумового заряда ENC – энергетическое разрешение (как и отношение сигнал/шум) для фотодетекторов всех видов при регистрации светового сигнала с Пуассоновским распределением числа фотонов может быть представлено в общем виде [15]:

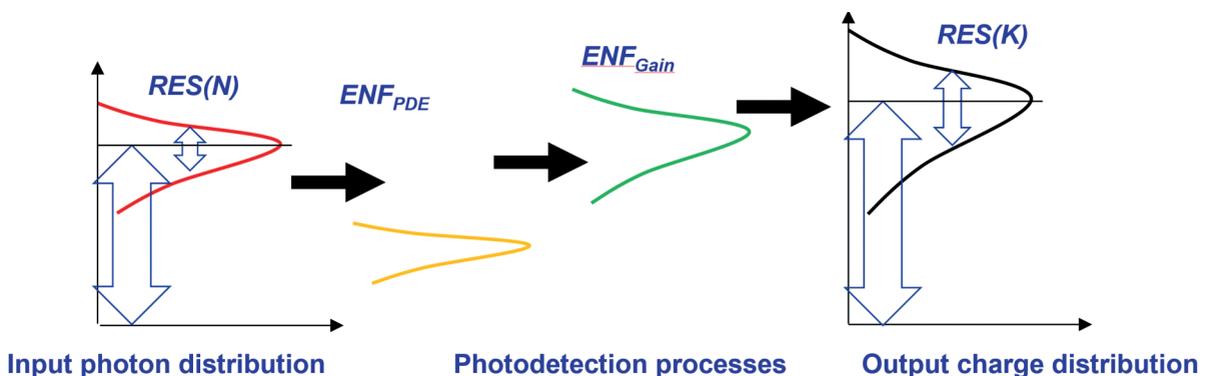


Рис.2. Схема поэтапного преобразования вероятностного распределения и разрешения сигнала RES от входа со случайным числом фотонов N к выходу со случайным числом электронов K . Для примера представлены два внутренних процесса: преобразование фотонов в электроны с шум-фактором ENF_{PDE} и умножение электронов с шум-фактором ENF_{Gain} .

$$RES(K) = \frac{I}{SNR(K)} = \frac{I}{\sqrt{\mu(N)}} \cdot \sqrt{ENF_{total} + \frac{ENC^2}{\mu(K)^2}}. \quad (11)$$

Табл.1. Аналитические выражения для специфических шум-факторов ENF случайных процессов детектирования и их вклады в общий шум фактор детектирования ENF_{total} (на примере кремниевых фотумножителей).

Случайный процесс	Параметры процесса	Типичные значения	Специфический шум-фактор процесса
Конверсия фотона в регистрируемый выходной импульс	Эффективность детектирования фотона PDE	5%-50%	$ENF_{PDE} = \frac{I}{PDE}$
Темновая генерация носителей	Частота счета DCR	$10^5 - 10^7$ Гц	$ENF_{DCR} = 1 + \frac{DCR \cdot T_{det}}{N_{ph} \cdot PDE}$
Лавинное умножение	Средний коэффициент $\mu(M)$, СКО $\sigma(M)$	$\mu(M) \approx 10^6$ $\sigma(M) \approx 10^5$	$ENF_M = 1 + \frac{\sigma^2(M)}{\mu^2(M)}$
Оптический кроссток	Вероятность P_{CT}	1%-40%	$ENF_{CT} = \frac{I}{I + \ln(1 - P_{CT})}$
После-импульсы	Вероятность P_{AP}	1%-20%	$ENF_{AP} = 1 + P_{AP}$
Шум-фактор в диапазоне линейности SiPM			$ENF_{LIN} = ENF_{PDE} \cdot ENF_M \cdot ENF_{CT} \cdot ENF_{AP} \cdot ENF_{DCR}$
Нелинейность из-за ограниченного числа пикселя	Загрузка пикселя n (среднее число фотонов N_{ph} на пиксель из N_{pix})		$ENF_{NL_{pix}} = \frac{\exp(n) - 1}{n}, \quad n = \frac{N_{ph} PDE}{N_{pix}}$
Нелинейность из-за мертвого времени пикселя	Частота загрузки пикселя λ за мертвое время T_{rec}		$ENF_{NL_{rec}} = 1 + \lambda T_{rec}, \quad \lambda = \frac{n}{T_{rec}}$
Общий шум-фактор детектирования			$ENF_{Total} = ENF_{LIN} \cdot \left\{ \begin{array}{l} ENF_{NL_{pix}}, T_{det} < T_{rec} \\ ENF_{NL_{rec}}, T_{det} > T_{rec} \end{array} \right\}$

Для детекторов частиц высоких энергий, особенно в задачах калориметрии, энергетическое разрешение является важнейшей общепринятой характеристикой.

В частности, для вакуумных фотоэлектронных умножителей это отражено в ГОСТ 11612.8-85 «Фотоумножители. Метод измерения энергетического разрешения» 1986 года, в котором задано определение энергетического разрешения RES_{FWHM} по выражению (2).

В случае детекторных систем на основе сцинтилляторов, число фотонов во вспышке которых имеет супер-Пуассоновское распределение, в подкоренном выражении (11) учитывается внутреннее разрешение сцинтиллятора R_{sci} :

$$RES(K) = 1/SNR(K) = \frac{1}{\sqrt{\mu(N)}} \cdot \sqrt{ENF_{total} + \frac{ENC^2}{\mu(K)^2} + R_{sci}^2}. \quad (12)$$

Порог чувствительности и обнаружительная способность

В системе российских стандартов в области фотоэлектрических полупроводниковых приемников излучения и фотоприемных устройств (ГОСТ Р 59605-2021, ГОСТ Р 59606-2021, ГОСТ Р 59607-2021) достаточно подробно представлены электрические, геометрические, спектральные, временные характеристики одноэлементных и матричных фотодетекторов, в том числе характеристики чувствительности. Однако в виде показателей качества, которые относятся к комбинации параметров и сигнала, и шума, фигурируют только порог чувствительности и обнаружительная способность.

Порог чувствительности (noise equivalent power, NEP) определяется интенсивностью светового потока, при котором $SNR = 1$ или, что то же самое, $RES = 1$.

Обнаружительная способность (detectivity, D) определяется как величина, обратная порогу чувствительности ($D = 1/NEP$).

Удельный порог чувствительности (specific NEP) определяется как порог чувствительности в единичной полосе частот (1 Гц) на единицу активной площади детектора.

Удельная обнаружительная способность (specific detectivity, D^*) определяется как величина, обратная удельному порогу чувствительности.

Эти показатели качества детектирования в основном ориентированы на фотоприемные устройства, предназначенные для непрерывной и динамичной регистрации интенсивности светового потока, например, ПЗС-матрицы с заданной частотой кадра. При детектировании импульсных сигналов эти показатели можно адекватно обратить на пороговое число фотонов в импульсе при $SNR = 1$ или $RES = 1$, а также при любом другом пороговом уровне, адекватном для данной прикладной задачи.

При этом пороговое число фотонов $\mu(N)$, заданное выражением (11) или (12) при $RES=1$, оказывается неявной функцией, у которой может не быть аналитического выражения, поскольку и относительный вклад шума электроники, и общий шум-фактор ENF_{total} зависят от $\mu(N)$. Для современных кремниевых фотоумножителей с $PDE \approx 50\%$ и вероятностью кросстолка $P_{ct} \approx 10\%$ при детектировании малофотонных световых импульсов наносекундного диапазона (шум электроники, темновой шум, шум умножения и нелинейность пренебрежимы) выражение для порогового числа фотонов в импульсе при $RES = 1$ согласно (11) можно представить в упрощенном виде:

$$\mu(N) = ENF_{PDE} \cdot ENF_{ct} = \frac{1 + P_{ct}}{PDE} \approx \frac{1,1}{0,5} = 2,2. \quad (13)$$

Общий шум-фактор и квантовая эффективность детектирования

Сигнал и шум на выходе фотодетектора зависит от сигнала и шума случайного числа фотонов на его входе (6), а разрешение сигнала на выходе определяется разрешением сигнала на входе и его ухудшением за счет внутренних шумов детектора (10) и считывающей электроники (11). Поэтому анализ качества или эффективности собственно детектора в передаче информации о сигнале более нагляден, если рассматривать относительную величину деградации SNR или RES от входа к выходу. Именно этот подход представлен определением ENF через выражение (7). А возможность представления общего шум-фактора ENF_{total} в виде произведения специфических шум-факторов внутренних процессов (10) дает удобную сравнительную оценку роли каждого из них в деградации SNR или RES выходного сигнала (табл.1).

Таким же, по существу, показателем качества детектора, как ENF_{total} , является квантовая эффективность детектирования (detective quantum efficiency, DQE). Эта характеристика была введена в 1970-х гг. как показатель качества детекторов рентгеновских изображений [21], получила широкое распространение [14] и вошла в международный стандарт IEC 62220-1-3 2008 года [10]).

Для одноэлементного детектора DQE определяется отношением SNR на выходе фотоприемника к SNR на его входе и обратна общему шум-фактору:

$$DQE[K|N] = \frac{SNR_K^2}{SNR_N^2} = \frac{\frac{\mu_K^2}{\sigma_K^2}}{\frac{\mu_N^2}{\sigma_N^2}} = 1/ENF_{total}. \quad (14)$$

Таким образом, для расчета DQE по (14) могут быть использованы аналитические выражения для специфических шум-факторов внутренних процессов детектирования, представленные в табл.1.

В частности, идеальный детектор будет иметь $DQE = 1$ или 100% для сигнала с любым числом фотонов, а детектор с квантовой эффективностью QE и без других видов внутренних шумов будет иметь $DQE = QE$ в диапазоне его линейности.

Сравнение фотодетекторов на основе показателя DQE

На основе показателя качества детектирования DQE достаточно удобно проводить сравнение как детекторов одного типа, так и разных типов, в том числе по их эффективности относительно идеального детектора. Это позволяет выбирать наиболее конкурентные типы и модели детекторов для конкретных применений. А при разработке детекторов показатель DQE показывает, насколько может быть повышена их эффективность, и за счет каких специфических шум-факторов это может быть достигнуто.

Сравнение фотодетекторов разных типов

Рассмотрим одну из типичных задач применения фотодетекторов со сцинтилляторами для детектирования короткого светового импульса длительностью $T_{pulse} = 10$ нс с временем интегрирования выходного сигнала $t_{int} = 100$ нс, при этом шум электроники $ENC = 3 \cdot 10^4$ (что типично

для полосы частот около 1 ГГц). В зависимости от числа фотонов в импульсе такую задачу могут решать вакуумные ФЭУ (PMT), кремниевые фотоумножители (SiPM), лавинные фотодиоды (APD), а также р-і-п-фотодиоды (PIN). Для оценки максимальной DQE предполагаем, что каждый прибор используется в спектральном диапазоне с его максимальной квантовой эффективностью QE или PDE .

Зададим типичные параметры специфических внутренних шум-факторов для этих типов фотодетекторов:

SiPM: $M = 10^6$, $ENF_M = 1,01$, $PDE = 55\%$, $P_{ct} = 10\%$, $DCR = 1 \text{ Мсps}$, $N_{pix} = 5676$;

PMT: $M = 10^6$, $ENF_M = 1,2$, $PDE = 25\%$, $DCR = 100 \text{ сps}$, $N_{sat} = 10^3$ электронов;

APD: $M = 10^2$, $ENF_M = 2$, $PDE = 85\%$, $DCR = 10 \text{ Ксps}$, $N_{sat} = 10^6$ электронов;

PIN: $M = 1$, $ENF_M = 1$, $PDE = 90\%$, $DCR = 10 \text{ Ксps}$, $N_{sat} = 10^9$ электронов.

Результаты расчета по формуле (11) с учетом табл.1 представлены на рис.3.

Все типы детекторов имеют выраженное плато оптимального детектирования с максимальной DQE . Нижняя граница плато связана с шумами электроники (для APD и PIN) и темновой генерации (для PMT и SiPM), которые начинают преобладать над сигналом при малом числе фотонов. Верхняя граница определяется нелинейностью и насыщением отклика детектора (для PIN она составляет около 10^9 фотонов и выходит за шкалу графика). Диапазон между нижней и верхней границей плато можно определить как диапазон оптимального детектирования. Для идеального детектора $DQE = 1$ при любом числе фотонов по определению.

Сравнение кремниевых фотоумножителей разных типов

Также представляет интерес сравнение квантовой эффективности детектирования ряда современных SiPM с разной конструкцией. В частности, наиболее широкое и массовое применение в мире получили кремниевые фотоумножители компании Hamamatsu Photonics (Япония), известные как Multi-Pixel Photon Counter (MPPC). Конструкция MPPC во многом повторяет и развивает подход на основе планарного лавинного р-п-перехода, заложенный в первые

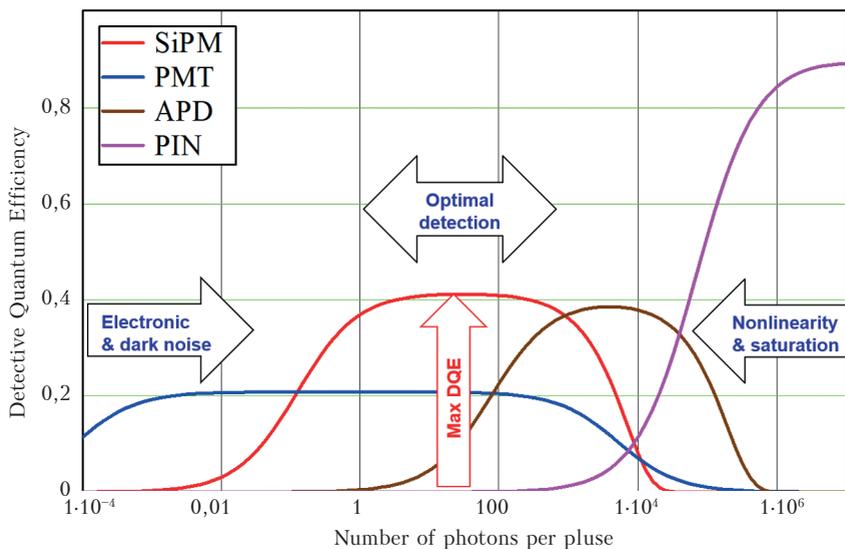


Рис.3. Зависимость квантовой эффективности детектирования для вакуумных ФЭУ (PMT), кремниевых фотоумножителей (SiPM), лавинных фотодиодов (APD) и р-і-п-фотодиодов (PIN) от среднего числа фотонов в импульсе по формулам табл.1.

российские SiPM разработки МИФИ/Пульсар [7,8] и включает в себя межпиксельные канавки (трени) для подавления оптического кросстолка, также впервые примененные в российских SiPM [1,11] (подробно рассматривается в Части 1.1 Обзора). Разработан ряд линеек или серий MPPC, одним из существенных различий между которыми является размер пикселя – гейгеровской ячейки ЛФД. С размером пикселя связано одно из наиболее существенных противоречий в оптимизации параметров SiPM – противоречие между эффективностью и динамическим диапазоном детектирования, которое подробно обсуждается в работах [2,3,18]. Поэтому в сравнительный анализ включены два наиболее характерных представителя SiPM с большим и с малым размером пикселя и с площадью 1 мм².

Принципиально другой подход к конструкции гейгеровской ячейки был представлен разработками MRS APD и Micro-Well APD [4,12,13] (подробно рассматривается в Части 1.1 Обзора). Лавинный пробой в них был локализован вокруг изолированных друг от друга p⁺ областях размером в несколько микрон в эпитаксиальном слое p-типа. Хотя разработки MRS APD и Micro-Well APD были остановлены, в развитие этого подхода была предложена концепция ЛФД на эффекте лавинного пробоя на острие (Tip APD, TAPD), и кремниевый фотоумножитель непланарной конструкции на основе заглубленного сферического p-n-перехода микронного размера был успешно разработан автором обзора в сотрудничестве с коллегами из НИЯУ МИФИ и КЕТЕК в 2021 г. [9,19,20,24]. Образцы TAPD показали рекордную квантовую эффективность $PDE_{max} = 73\%$, быстродействие (время восстановления 4 нс), широкий спектральный диапазон (400–800 нм при $PDE > 45\%$) и широкий динамический диапазон (размер пикселя 15 мкм). Поэтому такая конструкция представляется серьезным конкурентом для современных планарных SiPM.

Для сравнения общей квантовой эффективности современных кремниевых фотоумножителей рассмотрим два типичных варианта планарной конструкции SiPM (Hamamatsu MPPC с разной специализацией за счет больших и малых размеров ячеек) и вариант непланарной конструкции SiPM (TAPD с широким динамическим диапазоном).

Вариант 1: MPPC-50 с размерами пикселя 50 мкм, все параметры соответствуют спецификации серии S14160-3050HS High detection efficiency MPPC for PET scanners. Эта серия оптимизирована на достижение наилучшего энергетического разрешения при детектировании вспышек сцинтилляторов (например, для PET сканеров, для детекторов частиц высоких энергий), т. е. на максимальную PDE за счет больших ячеек (малые потери активной площади на границах) и с минимальным оптическим кросстолком между ячейками за счет специальных светопоглощающих тренчей на границах (https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s14160_s14161_series_kapd1064e.pdf).

Вариант 2: MPPC-15 с размерами пикселя 15 мкм, все параметры соответствуют спецификации серии S14160-1315PS Wide dynamic range MPPC, оптимизированную на достижение широкого динамического диапазона за счет малых размеров ячеек (большого числа ячеек на единицу площади), при сохранении достаточной эффективности для широкого круга задач (https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s14160-1310ps_etc_kapd1070e.pdf).

Вариант 3: TAPD-15 с размерами пикселя 15 мкм и площадью 1 мм², все параметры соответствуют данным публикаций [9,19,20,24].

Параметры для расчета DQE современных SiPM собраны в табл.2.

Табл.2. Расчет общей эффективности детектирования DQE для современных SiPM на основе планарных p - n -переходов и TAPD с заглубленными сферическими p - n -переходами.

Тип SiPM	MPPC-50	MPPC-15	TAPD-15
Эффективность PDE_{max}	50%	32%	73%
Размер ячейки, мкм	50	15	15
Коэффициент умножения M	$2 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
Вероятность кросстолка P_{ct}	7%	1%	30%
Темновой счет DCR , Гц/мм ²	$1 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^6$
Эффективность DQE_{max}	47%	31%	47%

Расчетные зависимости DQE от числа фотонов в импульсе по данным табл.2 представлены на рис.4.

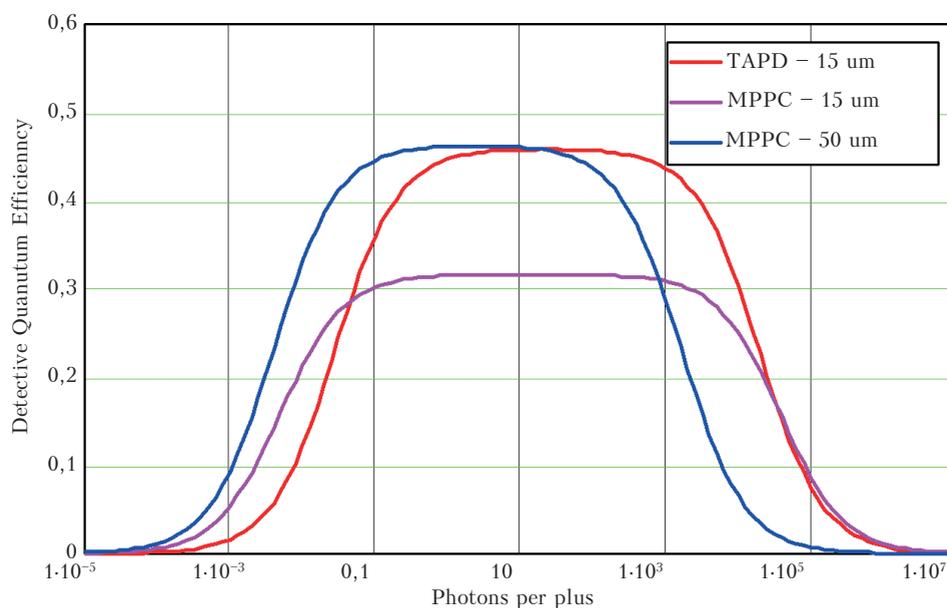


Рис.4. Зависимость квантовой эффективности детектирования DQE для планарных SiPM (MPPC-50 и MPPC-15) и непланарной конструкции SiPM (TAPD-15) от среднего числа фотонов в импульсе по данным табл.2.

Расчетные графики показывают, что TAPD-15 имеет такой же уровень максимальной DQE , как и MPPC-50, то есть практически одинаковый уровень плато DQE в диапазоне оптимального детектирования от 1 до 100 фотонов. Это связано с более высокой вероятностью кросстолка в TAPD-15, шум-фактор которого нивелирует преимущества TAPD-15 перед MPPC-50 в более высокой эффективности PDE . При этом TAPD-15 примерно на порядок превосходит MPPC-50 по верхней границе динамического диапазона, что однозначно определяется на порядок более высокой плотностью ячеек (5000 ячеек TAPD-15 против 400 ячеек MPPC-50 на 1 мм²). Такой же динамический диапазон имеет MPPC-15, но с заметно пониженным уровнем плато DQE . Обе модели MPPC имеют преимущества на нижней границе динамического диапазона, что связано с их низким уровнем темнового счета благодаря более высокому технологическому уровню полупроводникового производства компании Hamamatsu по сравнению с компанией КЕТЕК.

Заключение

В Части 2.2. Обзора рассматриваются показатели качества детекторов оптических сигналов и радиации, в которых одновременно учитываются сигнальные и шумовые характеристики случайных процессов преобразования входного сигнала, дается вероятностное описание таких показателей качества, как отношение сигнала к шуму и разрешения, порога чувствительности и обнаружительной способности. Отношение сигнала к шуму и разрешение – важные общепринятые показатели качества, удобные и необходимые в работе, однако они включают в себя статистику входного сигнала и потому не сосредоточены на оценке качества собственно детектора. Пороговые показатели недостаточно информативны, поскольку дают оценку работы детектора только в области пороговых сигналов. Общий шум-фактор ENF и общая квантовая эффективность детектирования DQE рассматриваются как универсальные показатели качества детектора в задачах регистрации числа фотонов в световых импульсах, типичных для этой прикладной области.

Применение разработанного подхода на основе ENF и DQE продемонстрировано в проведенном расчете и сравнительном анализе конкурентности различных типов фотодетекторов, а также современных моделей SiPM планарной и непланарной конструкции.

Литература

1. В. Dolgoshein и др., «Large area UV SiPMs with extremely low cross-talk», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2012, Т. 695, pp. 40-43.
2. S. Vinogradov, E. Popova, «Status and perspectives of solid state photon detectors», *Nucl. Instruments Methods, Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2020, Т. 952, № 1, pp. 161752.
3. S. Vinogradov и др. «Efficiency of Solid State Photomultipliers in Photon Number Resolution», *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2011, Т. 58, № 1, pp. 9-16.
4. А.В. Akindinov и др. «New results on MRS APDs, Nucl. Instruments Methods», *Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 1997, Т. 387, № 1-2, pp. 231-234.
5. H. Barrett, K. Myers, «Poisson Statistics and Photon Counting, Foundations of Imaging Science.», New York, USA: Wiley-Interscience», 2003, pp. 1584.
6. R.E. Burgess, «Some topics in the fluctuations of photo-processes in solids», *J. Phys. Chem. Solids*, 1961, Т. 22, pp. 371-377.
7. P. Buzhan и др. «An advanced study of silicon photomultiplier», *ICFA Instrum.Bull.*, 2001, pp. 28-41.
8. P. Buzhan и др. «Silicon photomultiplier and its possible applications», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2003, Т. 504, № 1–3. pp. 48-52.
9. E. Engelmann и др. «Tip Avalanche Photodiode – A New Generation Silicon Photomultiplier Based on Non-Planar Technology», *IEEE Sens. J.*, 2021, Т. 21, № 5. pp. 6024-6034.
10. International Electrotechnical Commission (IEC). International Standard: Medical electrical equipment – Characteristics of digital X-ray imaging devices – Determination of the detective quantum efficiency (IEC 62220-1-3), под ред. IEC., 2008, pp. 1-72.
11. D. McNally, V. Golovin, «Review of solid state photomultiplier developments by CPTA and photonique SA» *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2009, Т. 610, № 1, pp. 150-153.
12. Z. Sadygov и др. «Three advanced designs of micro-pixel avalanche photodiodes: Their present status, maximum possibilities and limitations», *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 2006, Т. 567, № 1. pp. 70-73.
13. Z.Y. Sadygov и др., «Investigation of the possibility of creating a multichannel photodetector based on the avalanche MRS-structure», *SPIE Proc. Optical Memory and Neural Networks*, 1991, pp. 158-168.

14. J.E. Tkaczyk и др., «Detective quantum efficiency of an energy resolving photon counting detector», Proc. SPIE., 2008, Т. 6913, pp. 69130N-69130N-11.
15. S. Vinogradov и др., «Efficiency of solid state Photomultipliers in photon number resolution», 2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC) : IEEE, 2009, pp. 1952-1958.
16. S. Vinogradov, «Probabilistic analysis of solid state photomultiplier performance», *Advanced Photon Counting Techniques VI.*, 2012a, pp. 83750S-83750S-9.
17. S. Vinogradov, «Analytical models of probability distribution and excess noise factor of solid state photomultiplier signals with crosstalk», Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.», 2012b, Т. 695, pp. 247-251.
18. S. Vinogradov, «Perfomance of Silicon Photomultipliers in photon number and time resolution», *Proceedings of International Conference on New Photo-detectors – PoS(PhotoDet2015). Trieste, Italy, IT: Sissa Medialab*, 2016, pp. 002.
19. S. Vinogradov и др., «Tip Avalanche Photodiode – A New Wide Spectral Range Silicon Photomultiplier», *Radiation Detection Systems. Boca Raton and London: CRC Press of Taylor & Francis Group*, 2021, 2nd Editio, pp. 257-288.
20. S. Vinogradov, «Tip Avalanche Photodiode – A spherical-junction SiPM concept», Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.» 2023, Т. 1045, pp. 167-596.
21. R.F. Wagner, E.P. Muntz, «Detective Quantum Efficiency (DQE) analysis of electrostatic imaging and screen-film imaging in mammography», SPIE Proc., под ред. J.E. Gray., 1979, pp. 162-167.
22. F. Wang и др., «How to characterize figures of merit of two-dimensional photodetectors» *Nat. Commun.*, 2023, Т. 14, № 1, pp. 1-9.
23. Виноградов С.Л. и др. Вероятностное распределение и шум-фактор сигналов твердотельных фотоэлектронных умножителей с учетом процессов кросс-толка // Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. 2009. № 9. С. 3-13.
24. Виноградов С.Л. О разработке кремниевого лавинного фотоумножителя с рекордными параметрами. Наноиндустрия. 2023. Т. 16. № S9-2 (119). С. 457-462.

Solid-State Detectors of Optical Signals and Radiation Part 2.2. Figures of Merit

Sergey Vinogradov (P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; Scientific Production Company «Doza», Zelenograd, Moscow, Russia)

Abstract. In continuation of the second part of the review of solid-state detectors of optical signals and radiation, generalized figures of merit and competitiveness of different types of detectors are considered. The review emphasizes the probabilistic description of random detection processes in solid-state detectors with avalanche multiplication.

Keywords: photodiode, avalanche photodiode, silicon photomultiplier, signal-to-noise ratio, resolution, excess noise factor, threshold sensitivity, detective quantum efficiency.

С.Л. Виноградов (с.н.с., к.ф.-м.н.) – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва; НПП «Доза», г. Зеленоград

Контакты: +7 (499) 132-62-86; vinogradovsl@lebedev.ru

Расчеты методом Монте-Карло поправочных коэффициентов для протонного калориметра

Наличие вакуумных зазоров в калориметрах, предназначенных для измерения доз ионизирующих излучений, приводит к изменению флюенса частиц, что в свою очередь приводит к изменению значения поглощенной дозы в точке измерения от того значения, которое было бы в однородной среде. Приведены результаты расчетов методом Монте-Карло поправочных коэффициентов, учитывающих искажение флюенса протонов медицинского пучка с энергией протонов от 50 до 250 МэВ для протонного калориметра, разработанного во «ВНИИФТРИ». Полученные результаты использованы для определения поглощенной дозы протонного излучения калориметром, вошедшем в состав Государственного первичного эталона ГЭТ 38-2024.

Ключевые слова:

протонное излучение, калориметр, флюенс протонов, поглощенная доза, метод Монте-Карло, пик Брэгга, дозиметрия.

**А.В.Берлянд¹, В.А.Берлянд¹,
Ю.Е.Титаренко², К.В.Павлов²,
В.Ф.Батяев²**

¹ ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, пос. Менделеево Московской обл.

² ФГБУ Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва

Лучевая терапия с использованием протонного излучения имеет существенное преимущество по сравнению с применением фотонного излучения. При попадании фотонного излучения (гамма-излучения Со-60 или тормозного излучения ускорителей электронов) на объект облучения поглощенная доза вначале растет за счет вклада рассеянного излучения, а затем падает примерно по экспоненциальному закону. В отличие от этого, кривая поглощенной дозы от протонов характеризуется низким значением дозы на большом участке своего пробега, а в конце пробега значение поглощенной дозы резко возрастает – так называемый пик Брэгга. Затем поглощенная доза протонов

падает до нуля, чего никогда не бывает в случае фотонного излучения. Положение пика Брэгга зависит от энергии протонного излучения. Поэтому меняя энергию частиц, можно обеспечить максимальное значение поглощенной дозы в нужной локализации при минимальном значении дозы в других точках облучаемого объекта. В соответствии с рекомендациями IAEA TRS-398 [1] дозиметрию протонного излучения для целей лучевой терапии надо проводить с помощью ионизационных камер, прокалиброванных в единицах поглощенной дозы в воде для данного вида излучения. Для того, чтобы определить калибровочный коэффициент ионизационной камеры для протонного излучения, используется калориметрический метод. Калориметрический метод измерения поглощенной дозы является единственным, который позволяет измерять эту величину в соответствии с ее определением. Поэтому этот метод рекомендован для использования в первичных эталонах поглощенной дозы различных видов ионизирующих излучений [2-5,10]. В ФГУП «ВНИИФТРИ» разработан графитовый транспортабельный протонный калориметр. Схематически разрез калориметра представлен на рис.1. Калориметр состоит из поглотителя (1), 1-й (2) и 2-й (3) оболочек, размещенных в мини-фантоме (4). Все детали изготовлены из графита и отделены друг от друга вакуумными зазорами.

Расчетное моделирование

Задачей является определение поправочных коэффициентов k_3 , учитывающих искажение флюенса протонов вакуумными зазорами калориметра. Для этого надо выполнить расчетное определение удельного энерговыделения (далее – УЭ) в центральной (измерительной) точке поглотителя от протонного пучка с энергией протонов от 50 до 250 МэВ, как в случае наличия зазоров между телом среды, как показано на рис.1, так и в случае отсутствия зазоров (измерительная точка в таком случае сдвигается влево на тройную толщину зазоров). Поправочные коэффициенты k_3 определяются через отношение УЭ без вакуумных зазоров к УЭ с вакуумными зазорами.

Вакуумные зазоры между поглотителем, оболочками и мини-фантомом имеют единую толщину 0,7 мм. Поглотитель имеет диаметр 20 мм. Ввиду нетривиальной геометрии среды такая задача может быть решена только с использованием программ переноса излучения

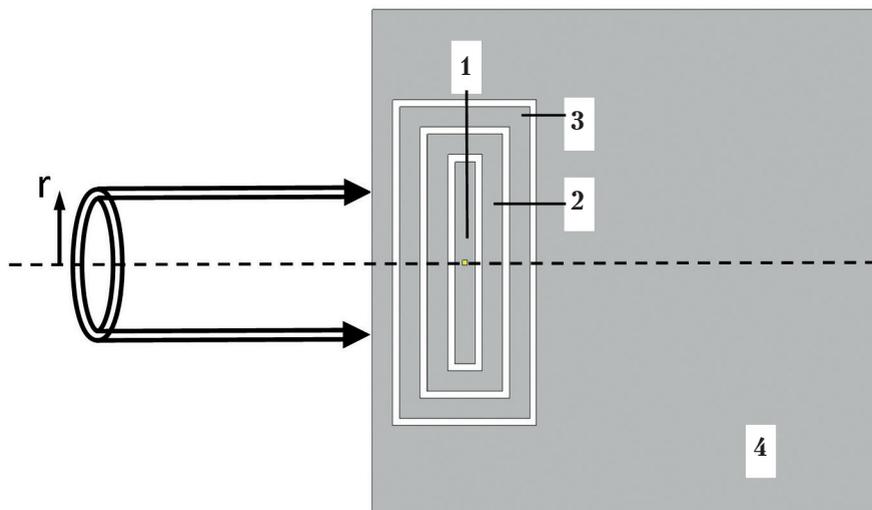


Рис.1. Разрез калориметра и схема модели взаимодействия с ним кольцевого пучка протонов.

в произвольной среде методом Монте-Карло. Одной из широко используемых таких программ является программа SHIELD [6]. Программа может вести транспорт практически любых частиц, включая протоны, нейтроны, фотоны, электроны с энергиями от долей эВ для нейтронов и от 1 кэВ до сотен ГэВ для остальных частиц. Программа позволяет создавать ячейки любой формы из комбинаций стандартных геометрических фигур, наполнять их материалами произвольного элементного состава и плотности, задавать первичные частицы, например, в виде пучков произвольного размера и рассчитывать функционалы различного типа, в частности, энерговыделение в заданных ячейках. В данной работе рассчитывались УЭ от первичных и вторичных протонов, а также от вторичных нейтронов в центральной ячейке. Ввиду того, что рассчитываемая ячейка имеет очень малый поперечный размер (диаметр 0,5 мм) в сравнении с размером возможного протонного пучка (диаметр от 20 мм и более), через нее может проходить лишь небольшая доля первичных и вторичных частиц пучка, что в свою очередь приведет к необходимости набора историй (статистики) гигантского размера для достижения необходимой в данной задаче точности. Очевидно, чтобы получить точность расчета УЭ, например, на уровне 10^{-2} % необходимо, чтобы через расчетную ячейку прошло не менее 10^8 частиц, т. е. флюенс моделируемых первичных протонов на оси калориметра должен быть на уровне 10^{11} р/см², что соответствует сотням млрд. историй при моделировании пучков с указанными выше размерами. Эта проблема может стать особенно острой, если необходимо получить результат для нескольких вариантов пространственного распределения протонного пучка. Чтобы сократить статистические требования, было предложено представить пучок с произвольной зависимостью плотности потока от радиуса в виде суммы (комбинации) отдельных вложенных друг в друга кольцевых пучков, внутренний и внешний радиус каждого из которых соответствует внешнему и внутреннему радиусу соседних пучков. В таком случае, имея такие расчетные индивидуальные УЭ в центральной ячейке для кольцевых пучков разных радиусов, можно получить интегральное УЭ для пучка произвольной радиальной зависимости путем сложения индивидуальных УЭ с соответствующими весами:

$$P_{In} = \sum_{i=1}^n [w_i \cdot p_i], \quad (1)$$

где w_i – весовые коэффициенты, соответствующие радиальной форме пучка и численно равные значениям плотности потока реального пучка на радиусе r_i , P_{In} – интегральное УЭ от первого кольцевого пучка до n -го, p_i – индивидуальное УЭ от кольцевого пучка с номером i и единичной плотности потока. Отметим также, что даже если плотность пучка имеет не одномерную (только от радиуса), а двухкоординатную зависимость, то и в этом случае возможно получить УЭ в центральной ячейке, используя в качестве w_i в формуле (1) средние значения плотности потока при радиусах r_i .

Результаты, представленные в данной работе, соответствуют пучку с единой плотностью потока во всех кольцах. При этом непосредственным результатом расчета программы SHIELD является исходное удельное энерговыделение (УЭ) размерности МэВ/г на исходный протон. Чтобы получить p_i – УЭ от кольцевого пучка i с единичной плотностью потока – исходное УЭ нормировалось на плотность потока протонов кольцевых пучков, что сводилось к умножению исходных УЭ на площади колец моделируемых пучков. В итоге значения УЭ, представленные на рис.2–6, получили размерность (МэВ/г)/(р/см²).

$$p_i^{ucx} [\text{МэВ/г}] / \varphi_i [p/\text{см}^2] = p_i^{ucx} [\text{МэВ/г}] \cdot S_i [\text{см}^2/p] = p_i [(\text{МэВ/г})/(p/\text{см}^2)], \quad (2)$$

где: $p_i^{исх}$ и p_i – соответственно, исходные и итоговые УЭ, рассчитываемые отдельно для всех колец i и всех энергий; φ_i и S_i – соответственно, плотность потока протонов и площадь кольцевого пучка i ; в квадратных скобках указаны размерности величин.

Для каждой протонной энергии были моделированы 70 кольцевых пучков с внешними радиусами от 0,25 мм до 17,5 мм. Количество историй в каждом моделировании составляло 250 млн протонов.

Результаты расчетного моделирования

На рис.2–6 представлены результаты расчетов УЭ в центральной ячейке при воздействии на calorimeter обеих версий (с зазорами и без них) кольцевых пучков протонов с энергией 50, 100, 150, 200 и 250 МэВ, соответственно. Для каждой протонной энергии было рассчитано 75 пучков равной радиальной ширины (0,25 мм) с максимальным внешним диаметром 35 мм. Первый пучок с нулевым внутренним и внешним радиусом, равным 0,25 мм, точно соответствует профилю расчетной ячейки, поэтому во всех случаях первый пучок дает максимальное УЭ. Второй пучок с радиусом в интервале 0,25–0,5 мм уже выходит за профиль расчетной ячейки и поэтому дает несколько меньшее УЭ. Как видно из рисунков, отношение УЭ от второго и первого пучков сильно зависит от энергии протонов. Эта зависимость объясняется обратной зависимостью среднего угла рассеяния протонов от его энергии. По мере удаления пучка от оси calorimeter главная роль в УЭ в расчетной ячейке постепенно переходит от первичных протонов к вторичным протонам и нейтронам, которые в отличие от первичных протонов движутся почти во всех направлениях. Вследствие этого, начиная с примерного 5-го пучка, зависимость УЭ от номера пучка становится более гладкой. При относительно малых энергиях протонов

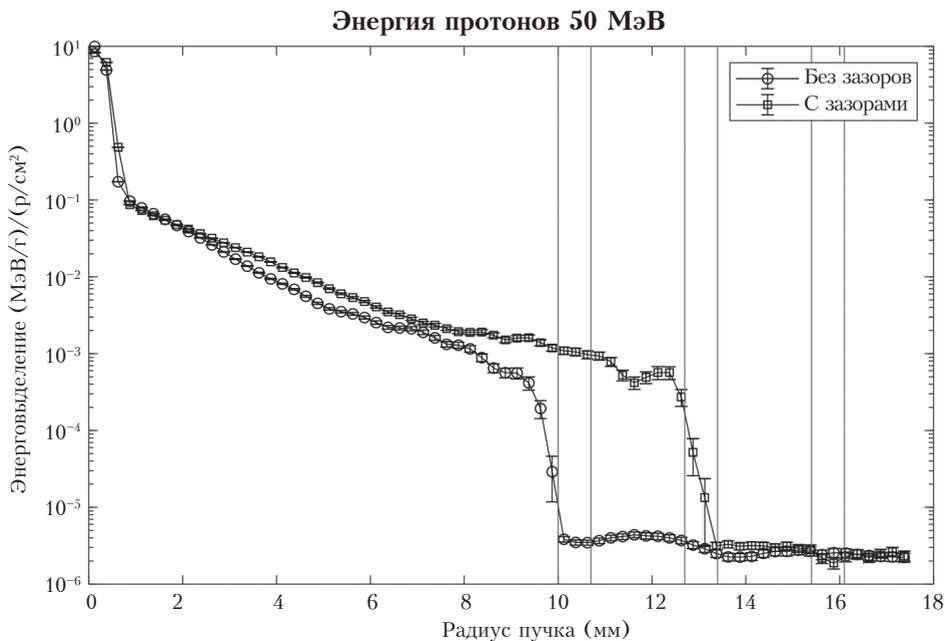


Рис.2. Результат моделирования УЭ в центральной ячейке в зависимости от радиуса воздействующего на calorimeter кольцевого пучка протонов с энергией 50 МэВ в случае наличия и отсутствия зазоров в коллиматоре. Внешний и внутренний радиусы всех пучков отличаются на 0,25 мм. Вертикальные линии соответствуют расположению боковых зазоров.

(50 МэВ) вторичные протоны имеют ограниченный радиальный пробег и поэтому в зависимостях УЭ от радиуса кольцевых пучков могут наблюдаться обрывы.

Интегрированием значений кольцевых УЭ, приведенных на рис. 2–6, по формуле (1) с единичными весами w_i были получены интегральные УЭ для обоих вариантов (с зазорами и без них) и далее отношения интегральных УЭ в зависимости от радиуса пучков.

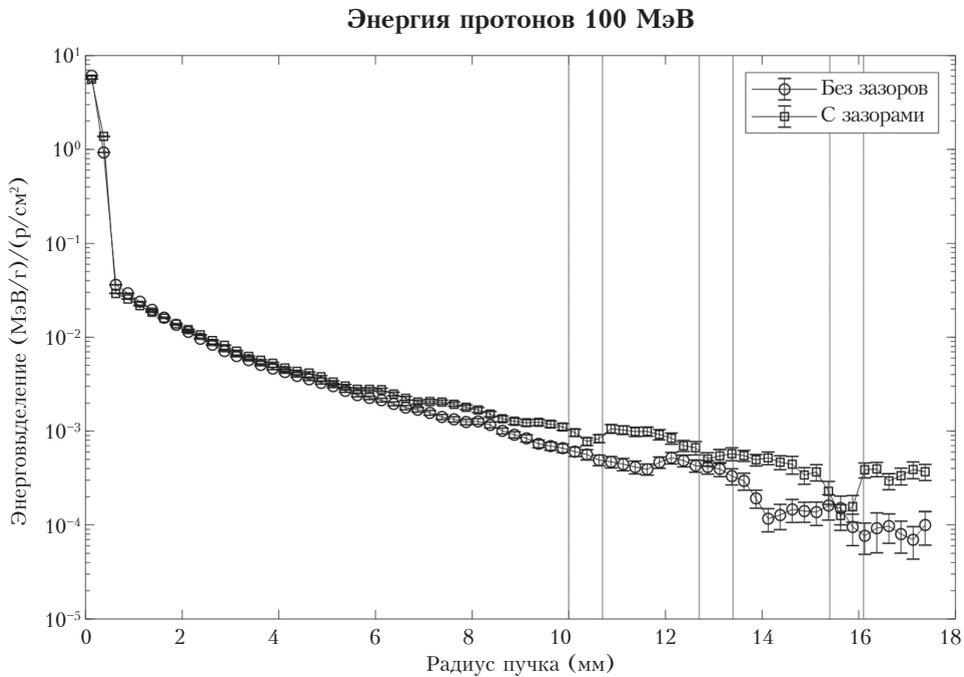


Рис.3. То же, что рис.2, но при энергии протонов 100 МэВ.

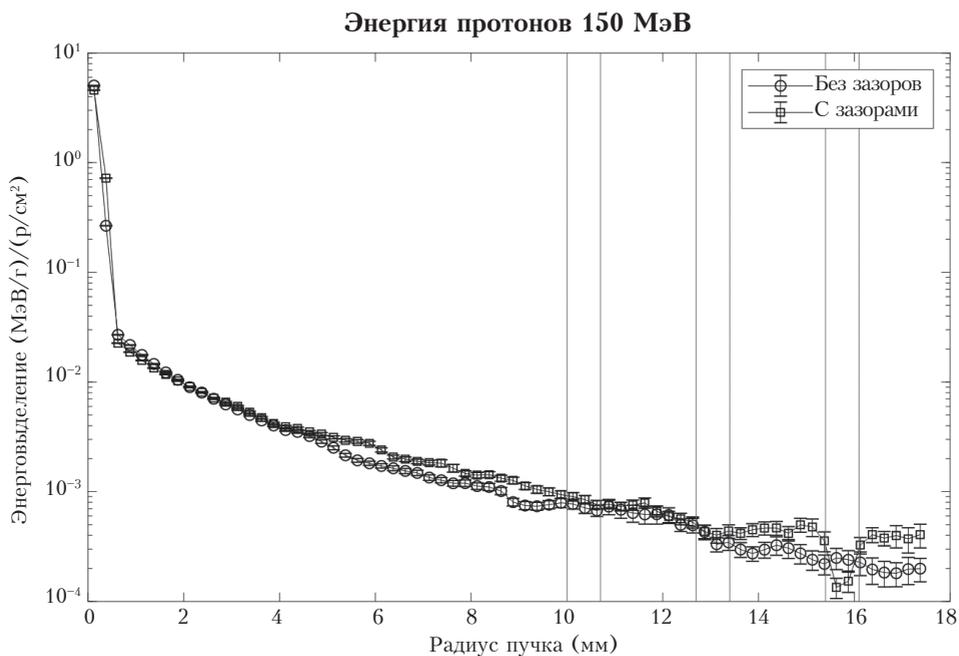


Рис.4. То же, что рис.2, но при энергии протонов 150 МэВ.

Результаты отношений УЭ «без зазоров/с зазорами» представлены на рис.7 для P_{In} , где n – от 2 до 75, что соответствует диаметру плоского пучка от 1 до 35 мм.

Результаты показывают, что для всех 5 энергий протонов отношение отличается от единицы менее чем на 1% для любых пучков диаметром более 1 мм.

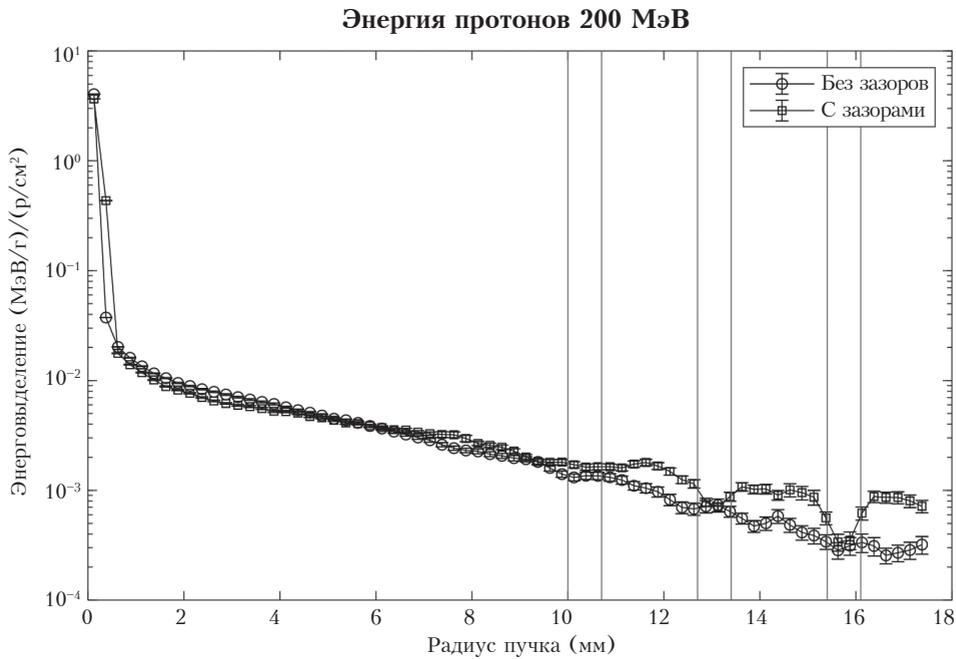


Рис.5. То же, что рис.2, но при энергии протонов 200 МэВ.

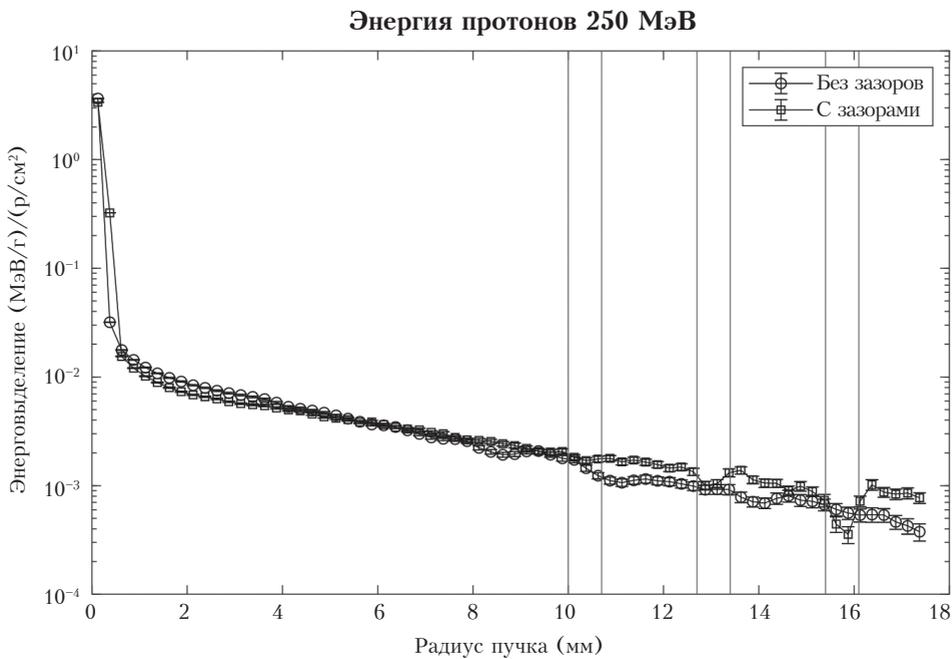


Рис.6. То же, что рис.2, но при энергии протонов 250 МэВ.

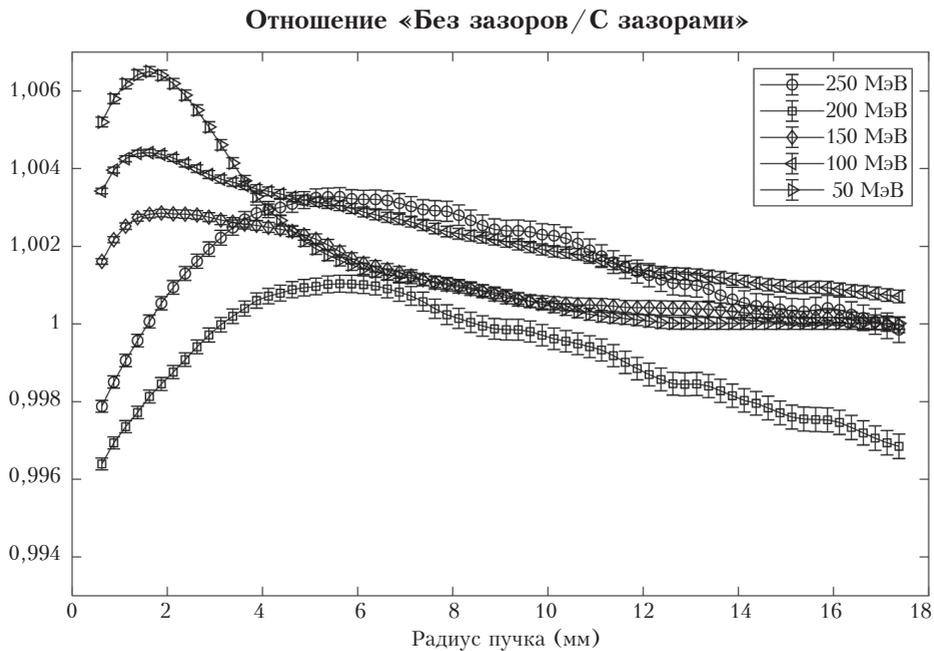


Рис.7. Отношения УЭ в центральной ячейке «без зазоров/с зазорами» в зависимости от радиуса плоского пучка при энергиях протонов 50, 100, 150, 200 и 250 МэВ.

Табл.1. Значения УЭ (МэВ/г) в центральной ячейке от плоского протонного пучка единичной плотности потока и диаметром 35 мм.

Энергия (МэВ)	УЭ «без зазоров» (МэВ/г)/(р/см ²)	УЭ «с зазорами», (МэВ/г)/(р/см ²)	k_3
250	3,9167±0,0009	3,9173±0,0009	0,9999±0,0003
200	4,3161±0,0009	4,3297±0,0010	0,9969±0,0003
150	5,5212±0,0007	5,5214±0,0008	1,0000±0,0002
100	7,2639±0,0008	7,2587±0,0009	1,0007±0,0002
50	15,648±0,002	15,648±0,002	1,0000±0,0002

Заключение

Расчеты поправочных множителей, учитывающих искажение флюенса протонов вакуумными зазорами калориметра, осуществлялись рядом автором с применением различных программ Монте-Карло. Конструкции калориметров достаточно близки, что позволяет сравнивать результаты расчетов. Так, в работе [7] в результате расчетов с использованием программы GEANT 4 были рассчитаны значения k_3 для 5 значений энергии моноэнергетических протонов в диапазоне энергий от 60 до 230 МэВ. Зависимость k_3 от энергии оказалась нелинейной, а значения k_3 менялись от 1,0006 для 60 МэВ до 1,0036 для 230 МэВ. В работе [8] для расчетов использовалась модифицированная версия Монте-Карло – PTRAN. Расчеты проводились для протонных пучков, модулированных и немодулированных, с энергией 62 МэВ. В результате расчетов установлено значение k_3 , равное единице со стандартной неопределенностью по типу А, обусловленной статистикой расчетов, равной 0,05%. Результаты, полученные в данной работе, не сильно отличаются от данных, полученных другими авторами. Различие может быть обусловлено различной конструкцией калориметров, а также использованием различных моделей расчетов.

Данные, полученные в результате расчетов методом Монте-Карло поправочных коэффициентов, позволили снизить систематическую погрешность определения поглощенной дозы протонного излучения калориметром из состава Государственного первичного эталона ГЭТ38-2024 [9].

Литература

1. 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.
2. «Clinical Proton Dosimetry Part I: Beam Production, Beam Delivery and Measurement of Absorbed Dose», 1998. ICRU Report 59. L. Verhey (Chairman), H. Blattman, P.M. DeLuca, and D. Miller.
3. J. Lyman et al. 1986 Protocol for heavy charged-particle therapy beam dosimetry. A report of Task group 20 Radiation Therapy Committee American Association of Physicists in Medicine Report 16 (New York: AIP).
4. S. Vynckier, D.E Bonnett and D. T. L. Jones, «Code of practice for clinical proton dosimetry», *Radiother. Oncol.*, № 20, 1991, pp. 53-63.
5. S. Vynckier, D.E. Bonnett and D. T. L. Jones, «Supplement to the code of practice for clinical proton dosimetry», *Radiother. Oncol.*, no. 32, 1994, pp. 174–179.
6. SHIELD – Расчет взаимодействия элементарных частиц со сложными средами. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008613935. 18 августа, 2008.
7. L.M. Petrie, S. Galer, D.Shipley, H.Palmans, «Monte Carlo calculated correction factors for the NPL proton calorimeter», *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 140, November 2017, pp. 383-385.
8. Hugo Palmans, Russell Thomas, Mary Simon, Simon Duane, Andrzej Kacperek, Alan DuSautoy and Frank Verhaegen, «A small-body portable graphite calorimeter for dosimetry in low-energy clinical proton beams», *Phys. Med. Biol.*, no. 49, 2004, p. 3737.
9. Берлянд А.В. Государственный первичный эталон единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы фотонного, электронного, протонного излучений и в пучках ионов углерода, количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжелых заряженных частиц ГЭТ 38-2024 // Измерительная техника. 2024. № 9. С. 12.
10. Берлянд А.В., Берлянд В.А. Методическое обеспечение дозиметрии для целей лучевой терапии // Альманах современной метрологии. 2019. № 3(19). С. 54-57.

Monte Carlo Calculations of Correction Coefficients for a Proton Calorimeter

Berlyand Alexander¹, Berlyand Vladimir¹, Titarenko Yury², Pavlov Kirill², Batyaev Viacheslav²

¹ FSUE All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russia

² Alikhanov Institute of Theoretical and Experimental Physics of the Kurchatov Institute National Research Center, Moscow, Russia

Abstract. The presence of vacuum gaps in calorimeters designed to measure doses of ionizing radiation leads to a change in particle flux, which in turn leads to a change in the value of the absorbed dose at the measuring point from the value that would be in a homogeneous medium. The results of Monte Carlo calculations of correction coefficients that take into account the distortion of the fluence of protons in a medical beam with a proton energy from 50 to 250 MeV for a proton calorimeter developed by VNIIFTRI are presented. The results obtained were used to determine the absorbed dose of proton radiation with a calorimeter included in the State Primary Standard GET 38-2024.

Keywords: *proton radiation, calorimeter, proton fluence, absorbed dose, Monte Carlo method, Bragg peak, dosimetry.*

А.В.Берлянд (к.т.н., нач.лаб.)¹, В.А.Берлянд (к.т.н., в.н.с.)¹, Ю.Е.Титаренко (профессор, д.ф.-м.н., нач.лаб.)², В.Ф.Батяев (к.ф.-м.н., с.н.с.)², К.В.Павлов (к.ф.-м.н., в.н.с.)²

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, пос. Менделеево Московской обл.*

² *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва*

Контакты: +7 (495) 660-17-44; sander.00007@gmail.com.

Испытания алгоритма автоматического определения импульсного излучения в дозиметре ДКС-АТ1123

Данная публикация является продолжением цикла статей, посвященных оценке работоспособности дозиметрического оборудования в полях импульсного фотонного излучения. В ней рассматривается работа алгоритма автоматического определения импульсного характера поля фотонного излучения. Данный алгоритм позволяет определять характер поля излучения и осуществлять переключение дозиметрического оборудования в требуемый режим при измерениях мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)$ в импульсных или непрерывных полях. Корректность работы алгоритма проверена путем его практической реализации в опытном образце модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 с последующими измерениями, выполненными в полях нано-, микро- и миллисекундного импульсного излучения с известными дозиметрическими и временными характеристиками. Показано, что дозиметр ДКС-АТ1123 при реализации в нем такого алгоритма позволяет автоматически определять импульсный характер поля фотонного излучения и корректно переключаться в необходимый режим работы при измерениях мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)$. Реализация данного алгоритма в дозиметре ДКС-АТ1123, а также иные улучшения технических характеристик планируются в ходе его модернизации.

**И.А.Алексейчук,
А.А.Загороднюк, С.В.Лазаренко,
М.В.Масюкович, А.Н.Новик,
В.И.Петров, А.Ю.Тараев**

Научно-производственное унитарное предприятие
«АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь

Ключевые слова: линейный ускоритель электронов, ангиограф, импульсное фотонное излучение, дозиметрическое оборудование, автоматическое определение импульсного излучения.

Ранее в цикле публикаций [1-4] была произведена оценка работоспособности дозиметра ДКС-АТ1123 при проведении измерений в полях импульсного фотонного излучения. Было показано, что дозиметр ДКС-АТ1123 способен работать в полях импульсного микросекундного фотонного излучения, генерируемого линейными ускорителями электронов. Дозиметр корректно измеряет среднюю мощность амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)$ (далее – СМАЭД) при условии, что мощность амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)$ в единичном импульсе (далее – МАЭД в импульсе) не превышает значения равного 0,5 Зв/с [4]. Измерения, описанные в статьях [1-4], выполнялись в лабораторных условиях, когда оператору были известны все основные временные, дозиметрические и энергетические характеристики поля импульсного излучения. Однако на практике оператору заранее не всегда известно, в поле какого излучения (импульсного или непрерывного) он производит измерения.

Для получения правильных результатов измерений мощности дозы знание характера излучения имеет принципиальное значение [5,6]. Поэтому для корректного измерения

СМАЭД в дозиметре необходимо реализовать приборный алгоритм, позволяющий определять характер фотонного излучения (импульсное или непрерывное) и перевести дозиметр в подходящий режим работы.

Предприятием «АТОМТЕХ» был разработан алгоритм, позволяющий автоматически определять характер поля излучения (непрерывное или импульсное излучение) с последующим переключением дозиметра в соответствующий режим работы.

Целью настоящей работы является проверка работоспособности данного алгоритма. Корректность работы алгоритма была проверена путем его реализации в экспериментальном образце модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 [7] с последующей апробацией путем прямых измерений в полях непрерывного фотонного излучения (гамма-излучение – установки УДГ-АТ110 [8] и УДГ-АТ130 [9] с радионуклидами ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co ; рентгеновское излучение – установка поверочная рентгеновского непрерывного излучения УПР-АТ300 [10]) и импульсного фотонного излучения милли-, микро- и наносекундного диапазона (источники излучения – медицинский ангиограф *Toshiba Infx 8000v* для миллисекундного излучения, медицинский линейный ускоритель электронов *Elekta Infinity* [11] для микросекундного излучения и экспериментальная установка импульсного наносекундного рентгеновского излучения УДР-АТ250 на основе аппарата рентгеновского излучения Памир-250).



Рис.1. Испытания экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 с улучшенным алгоритмом в полях непрерывного гамма-излучения, создаваемых на установке УДГ-АТ130.

Проверка работоспособности экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 с алгоритмом автоматического определения характера излучения в полях непрерывного излучения

Для создания полей непрерывного фотонного излучения использовались следующие источники:

- установка дозиметрическая гамма-излучения УДГ-АТ110 [8] с набором источников ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am, ⁶⁰Co;
- установка дозиметрическая гамма-излучения эталонная 1-го разряда УДГ-АТ130 [9] с набором источников ¹³⁷Cs;
- установка поверочная рентгеновского излучения УПР-АТ300 [10].

Для примера схема испытаний прибора на дозиметрической установке непрерывного излучения УДГ-АТ130 представлена на рис. 1. При измерениях в полях непрерывного излучения дозиметр включен в режим автоматического определения импульсного излучения. При измерениях контролировалась СМАЭД и установившийся режим измерений. Результаты испытаний приведены в табл. 1, 2.

Табл. 1. Результаты испытаний работы экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях непрерывного гамма-излучения, создаваемого на установках УДГ-АТ110 и УДГ-АТ130.

Контрольная точка, мкЗв/ч	Нуклид	Установившийся режим измерений	СМАЭД (измерения) $\dot{H}^*(10)$, мкЗв/ч
20	²⁴¹ Am	Непрерывный	19,8
200			197
20	⁶⁰ Co		21,5
200			220
70	¹³⁷ Cs		69,9
700			699
7000			7010
70000			69900
700000			703000
7000000			6980000

Из анализа результатов испытаний следует, что при облучении в поле непрерывного фотонного излучения дозиметр корректно определяет тип излучения при различных значениях СМАЭД и качествах излучения. Значения СМАЭД, измеренные дозиметром, согласуются с паспортными значениями СМАЭД, генерируемыми установками в точке измерения. Расхождение между паспортными и измеренными значениями СМАЭД находится в пределах погрешности дозиметра с учетом его энергетической зависимости.

Проверка работоспособности экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 с алгоритмом автоматического определения характера излучения в полях импульсного излучения

Для создания полей импульсного излучения применялись:

- экспериментальная установка дозиметрическая импульсного наносекундного рентгеновского излучения УДР-АТ250 (далее – УДР-250);
- линейный ускоритель электронов Elekta Infinity (далее – ЛУЭ), генерирующий микросекундное импульсное фотонное излучение;
- медицинский ангиограф Toshiba Infx-8000v (далее – ангиограф) для миллисекундного излучения.

Проверка воспроизводимости измерений проводилась согласно схеме [4]. Для случая измерений в поле импульсного излучения, генерируемого ЛУЭ, контролировался установившийся режим измерений дозиметра. Значения СМАЭД, измеренные дозиметром, сравнивались с опорными величинами, генерируемыми ЛУЭ в точке измерения. Под опорной величиной понимается значение СМАЭД в заданной точке, полученное путем пересчета мощности кермы согласно методике, детально описанной в работах [1-4].

Табл.2. Результаты испытаний экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях непрерывного рентгеновского излучения, создаваемого на установке УПР-АТ300.

Контрольная точка, мкЗв/ч	Качество излучения	Установившийся режим измерений	СМАЭД (измерения) $\dot{H}^*(10)$, мкЗв/ч
190,8	N100 (средняя энергия излучения – 87,9 кэВ)	Непрерывный	170,33
678,2			600
970,6			860
1460			1300
6712			6200
23930			22000
192300			184000
178,3	N300 (средняя энергия излучения – 254 кэВ)		164,67
738,3			643
1037			930
1531			1380
8077			7400
25450			23300
195300			179000

Для случая измерений в полях импульсного излучения, генерируемых УДР-250 и ангиографом, контролировался установившийся режим работы дозиметра. Показания дозиметра при измерениях в данных полях приводятся справочно ввиду отсутствия методики, позволяющей пересчитать мощность кермы, генерируемой УДР-250 и ангиографом в опорную величину (СМАЭД).

Схема испытаний на дозиметрической установке импульсного наносекундного рентгеновского излучения УДР-АТ250 представлена

Табл.3. Результаты испытаний экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях импульсного наносекундного рентгеновского излучения, создаваемого на установке УДР-АТ250.

Позиция точки измерения	Установившийся режим измерений дозиметра	СМАЭД (измерения) $\dot{H}^*(10)$, мкЗв/ч
Позиция 1	Импульсный	23
Позиция 2	Импульсный	79
Позиция 3	Импульсный	490

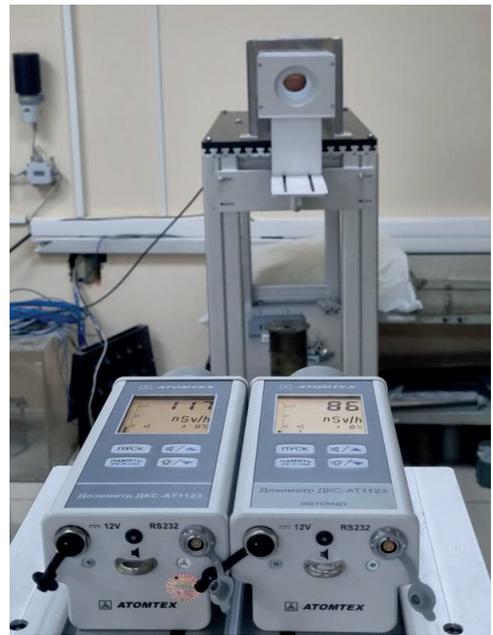
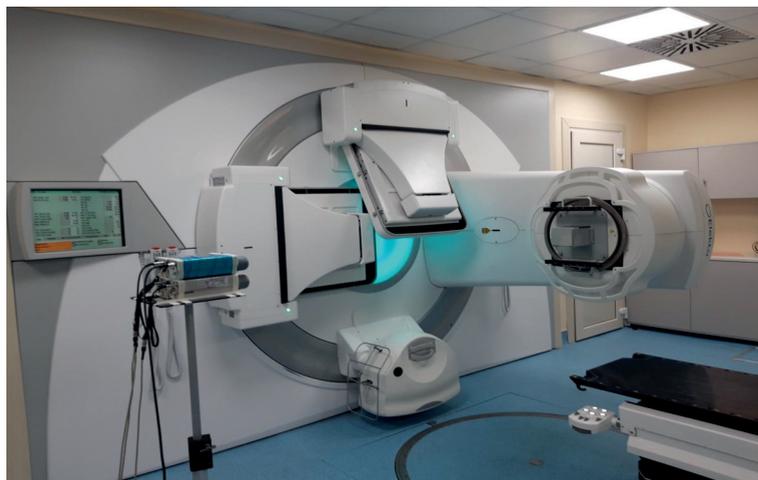


Рис.2. Испытания экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях импульсного наносекундного рентгеновского излучения, создаваемого на установке УДР-АТ250.

на рис.2. Основные характеристики установки: амплитуда напряжения на рентгеновской трубке 250 кВ, длительность единичного импульса 10 нс, частота повторения импульсов 10 Гц. При испытаниях устанавливалось время экспозиции, равное 30 сек. Мощность дозы в точке измерения варьировалась путем изменения заданного расстояния от излучателя до точки измерения (позиция 1, 2, 3). Результаты испытаний приведены в табл.3.

Схема испытаний на линейном ускорителе электронов аналогична схеме, детально описанной в работе [4], и представлена на рис.3. Испытания на ЛУЭ проводились со следующими параметрами излучения: ускоряющее напряжение первичного электронного пучка 6, 10 МВ; время экспозиции 30 сек. Длительность импульса составляет 2 мкс; частота повторения импульсов от 12 до 400 Гц [3]. Мощность дозы, выраженная в мониторных единицах (далее – МЕ), отпускаемых ЛУЭ в минуту, устанавливалась равной 40 и

Рис.3. Испытания экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях импульсно-микросекундного излучения, создаваемого на ЛУЭ Elekta Infinity.



640 МЕ. Под мощностью отпускаемой ЛУЭ дозы понимается выраженное в МЕ значение мощности дозы, генерируемое на выходе излучателя ЛУЭ и измеряемое встроенной в излучатель мониторинговой камерой. Под мониторинговой единицей понимается доза, поглощенная в расположенном на расстоянии 1 метр от излучателя ЛУЭ водном фантоме на глубине 10 см, равная 1 сГр [12]. Результаты измерений представлены в табл.4.

Ангиограф Toshiba Infx-8000v, на котором производились испытания экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях миллисекундного фотонного излучения, представлен на рис.4. Основные характеристики ангиографа: частота повторения импульсов 10 Гц, длительность единичного импульса 1, 2, 6 мс. Мощность дозы, создаваемая ангиографом в точке измерения, задавалась путем изменения тока в интервале от 10 до 100 мА и находилась

в интервале 9–700 мкЗв/ч. Схема испытаний дозиметра на ангиографе аналогична схеме испытаний на линейном ускорителе электронов. В ходе испытаний контролировался установившийся режим работы дозиметра. Результаты испытаний приведены в табл.5.

Результаты испытаний показывают, что во всех выше описанных схемах экспериментальный образец модернизированной версии дозиметра корректно определял характер излучения и автоматически переключался в необходимый режим измерений. Для случая измерения в полях, генерируемых ЛУЭ, показания дозиметра имеют хорошее совпадение с опорными величинами СМАЭД.

Заключение

В статье приведены результаты испытаний экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 с алгоритмом автоматического определения характера

Табл.4. Результаты испытаний экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях импульсного микросекундного излучения, создаваемого на ЛУЭ Elekta Infinity.

Опорная величина, мкЗв/ч	Режим ЛУЭ	Мощность дозы, МЕ/мин	Установившийся режим измерений дозиметра	СМАЭД (измерения) $\dot{H}^*(10)$, мкЗв/ч
2000	6 МВ	40	Импульсный	2100
32000		640	Импульсный	33000
2310	10 МВ	40	Импульсный	2710
37000		640	Импульсный	39000



Рис.4. Ангиограф Toshiba Infx-8000v.

Табл.5. Результаты испытаний экспериментального образца модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123 в полях импульсного миллисекундного излучения, создаваемого на медицинском ангиографе Toshiba Infx-8000v.

Длительность импульса, мс	Установившийся режим измерений дозиметра	СМАЭД (измерения) $\dot{H}^*(10)$, мкЗв/ч
1	Импульсный	9,3
	Импульсный	106
2	Импульсный	18,5
	Импульсный	217
6	Импульсный	56
	Импульсный	650

излучения в полях непрерывного и импульсного фотонного излучения с известными дозиметрическими и временными характеристиками.

Прямые измерения показали, что дозиметр ДКС-АТ1123 с данным алгоритмом корректно определяет характер поля фотонного излучения и автоматически переключается в необходимый режим измерений.

При измерениях в фотонных полях непрерывного излучения, создаваемого поверочными дозиметрическими установками гамма- и рентгеновского излучения, дозиметр автоматически переключался в режим измерения

непрерывного излучения. Максимальное отклонение между показаниями дозиметра и паспортными значениями СМАЭД, генерируемыми установками непрерывного излучения в точке измерения, не превышало основной погрешности дозиметра в 15%.

При измерениях в фотонных полях импульсного нано-, микро- и миллисекундного излучения, создаваемого УДР-АТ250, ЛУЭ Elekta Infinity и ангиографом Toshiba Infx-8000v, соответственно, дозиметр автоматически переключался в режим измерения импульсного излучения. Для случая измерения в поле излучения ЛУЭ максимальное отклонение показаний, измеренных дозиметром СМАЭД, от опорных величин лежат в пределах основной погрешности дозиметра и не превышают 15%.

Для УДР-250 и ангиографа в настоящий момент отсутствует методика, позволяющая произвести корректный пересчет мощности кермы в СМАЭД. Поэтому в данной работе исследовалась работоспособность дозиметра при проведении измерений в полях излучения этих источников без привязки к опорным дозиметрическим величинам. В дальнейшем планируется разработка методик расчета опорных дозиметрических величин для данных источников излучения с проведением повторных исследований работоспособности модернизированной версии дозиметра ДКС-АТ1123.

Авторы публикации выражают глубокую благодарность директору предприятия «АТОМТЕХ», к.т.н. Кожемякину В.А. за полезные замечания и рекомендации при ее подготовке.

Литература

1. Загороднюк А.А., Тараев А.Ю., Лазаренко С.В., Комар Д.И. Влияние свинцового фильтра на среднюю энергию фотонного излучения медицинского линейного ускорителя электронов // АНРИ. 2023. № 2(113). С. 13-24.
2. Загороднюк А.А., Тараев А.Ю., Лазаренко С.В. О возможности использования медицинских линейных ускорителей электронов в качестве поля эталонного импульсного фотонного излучения // Приборы и методы измерений. 2023. Т. 14, №3. С. 179-190.
3. Тараев А.Ю., Загороднюк А.А., Богдан М.А., Лазаренко С.В. Оценка характеристик полей фотонного излучения медицинских линейных ускорителей электронов различных производителей // АНРИ. 2023. № 4(115). С. 19-31.
4. Тараев А.Ю., Загороднюк А.А., Лазаренко С.В., Масюкович М.В. Оценка функционирования дозиметрического оборудования при проведении измерений в полях импульсного микросекундного фотонного излучения с известными характеристиками // АНРИ. 2024. № 2(117). С. 17-26.
5. R. Behrens, H. Zutz, J. Busse, «Spectrometry of pulsed photon radiation», *J. Radiol. Prot.*, vol. 42, no. 1, pp. 2-11, 2022.
6. Мартынюк Ю.Н., Нурлыбаев К., Ревков А.А. Дозиметрия импульсного излучения // АНРИ. 2018. № 1(92). С. 2-11 .
7. Дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123. URL: <https://atomtex.com/ru/dozimetry-rentgenovskogo-i-gamma-izlucheniya-dks-at1121-dks-at1123> (дата обращения: 9.06.2025).
8. Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ110. URL: <https://atomtex.com/ru/dozimetriceskaya-ustanovka-gamma-izlucheniya-udg-at110> (дата обращения: 9.06.2025).
9. Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ130. URL: <https://atomtex.com/ru/dozimetriceskaya-ustanovka-gamma-izlucheniya-udg-at130> (дата обращения: 9.06.2025).
10. Установка поверочная рентгеновского излучения УПР-АТ300 URL: <https://atomtex.com/ru/ustanovki-poverochnye-rentgenovskogo-izlucheniya-upr-at300-upr-at3001-upr-at3002> (дата обращения: 9.06.2025).
11. Elekta Medical Linear Accelerator. Site Planning Construction Information. Elekta Limited, 2014, 112 p.
12. L.W. Brady, T.E. Yaeger. *Encyclopedia of Radiation Oncology*, Springer, 2013, 1015 p.

Testing the Algorithm for Automatic Detection of Pulsed Radiation in the DKS-AT1123 Dosimeter

Alekseychuk Ivan, Zaharadniuk Aleksei, Lazarenko Sergey, Masukovich Maksim, Novik Aleksandr, Petrov Vitaly, Taraev Aleksandr (ATOMTEX SPE, Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This publication is a continuation of the series of articles devoted to the assessment of performance of dosimetric equipment in the fields of pulsed photon radiation. It deals with the algorithm for automatic determination of the pulsed character of the photon radiation field. The publication describes the main criteria that allow to determine the character of the radiation field and to switch the dosimetric equipment to the required mode when measuring the ambient dose equivalent rate $\dot{H}^*(10)$. The correctness of the algorithm operation was verified by its practical realization in the dosimeter DKS-AT1123 during measurements made in the fields of nano- and microsecond pulse radiation with known dosimetric and temporal characteristics. It is shown that the dosimeter DKS-AT1123, when implementing such an algorithm, can detect the pulsed nature of the photon radiation field and correctly switch to the required mode of operation when measuring the ambient dose equivalent rate $\dot{H}^*(10)$. Implementation of this algorithm in the dosimeter DKS-AT1123, as well as other improvements of technical characteristics are planned in the course of its modernization.

Keywords: *linear electron accelerator, pulsed photon field, dosimetric equipment, automatic detection of pulsed radiation.*

И.А.Алексейчук (нач.сект.), А.А.Загороднюк (вед.инж.), С.В.Лазаренко (вед.инж.), М.В.Масюкович (вед.инж.-констр.), А.Н.Новик (вед.инж.), В.И.Петров (гл.спец.по ПО), А.Ю.Тараев (вед.инж.)

Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Респ. Беларусь

Контакты: +375 29 171-13-72; zaharadniuk_aa@atomtex.com

Определение оптимального времени использования термолюминесцентных дозиметров при ведении индивидуального дозиметрического контроля с помощью термолюминесцентной дозиметрической автоматизированной системы Harshaw

Проведен эксперимент по измерению скорости накопления дозы дозиметрами типа 0110 Harshaw в количестве 120 штук на протяжении трех месяцев. Выявлено, что измерения накопленной дозы дозиметров, прошедших отжиг, дают не нулевой результат, а составляют порядка 0,1 мЗв. Последующие измерения остальных дозиметров показали, что скорость набора дозы составляет порядка $0,00344 \pm 0,00025$ мЗв/сутки, что не соответствует показаниям МКС-АТ1117М $0,0046 \pm 0,0009$ мЗв/сутки. Выдвинуто предположение, что необходимо учитывать выявленный эффект при определении индивидуального эквивалента дозы внешнего облучения нижней части живота для женщин репродуктивного возраста или использовать иной способ определения данной величины.

Ключевые слова:

термолюминесцентный дозиметр, индивидуальный дозиметрический контроль, индивидуальный эквивалент дозы, автоматизированная термолюминесцентная дозиметрическая система Harshaw, двухэлементные дозиметры типа 0110.

А.А.Коваленко¹,

М.М.Балачков², Е.А.Юрченко²

¹ Филиал АО «Концерн Росэнергоатом»

«Ленинградская атомная станция», г. Сосновый бор Ленинградской обл.

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

На всех атомных станциях России на данный момент для ведения индивидуального дозиметрического контроля используются термолюминесцентные дозиметры. Особенность данных дозиметров заключается в том, что они являются «накопительными», и их использование на короткий промежуток времени (менее одного месяца) нецелесообразно из-за высокой нижней границы регистрируемой дозы в 100 мкЗв. Термолюминесцентные дозиметры (далее – ТЛД) предполагают использование в течение длительного периода, но в реальных условиях это в ряде случаев невозможно. Так, например, согласно НРБ-99/2009 [1] для женщин

репродуктивного возраста необходимо контролировать эквивалентную дозу внешнего облучения на нижней части живота каждый месяц. При использовании системы Harshaw с дозиметрами типа 0110 на короткий срок наблюдаются «набросы доз». Под «набросом доз» в данной работе понимаются завышенные результаты измерения индивидуальных эквивалентов доз ТЛД. Детекторы дозиметров типа 0110 изготовлены из LiF, который обладает рядом преимуществ, хорошо отраженных в [2]. Основной особенностью этого материала является тканеэквивалентность к фотонному излучению, а точнее, близость по эффективному атомному номеру к биологической ткани.

В одной партии дозиметров даже при условии максимальной стандартизации могут иметься различия между детекторами по массе, толщине и оптическим свойствам. В работе [3] отмечены несколько факторов, которые вносят основной вклад в погрешность термолюминесцентных дозиметров при измерении индивидуального эквивалента дозы, а именно: разброс уровня собственного фона детекторов, разброс калибровочных коэффициентов дозиметров в партии относительно среднего и изменение чувствительности детекторов при длительной эксплуатации.

В [4] проведен обширный эксперимент по тестированию дозиметров типа 7776 Harshaw для проверки термолюминесцентной системы по всем критериям ИЕС 61066, и система признана удовлетворяющей всем требованиям. ИЕС 61066 – это международный стандарт, который устанавливает метрологические и технические требования к термолюминесцентным дозиметрическим системам для индивидуального дозиметрического контроля и мониторинга окружающей среды. В [5] проведено сравнение систем Harshaw и Дозы-ТЛД, у дозиметров обеих систем достаточно точная сопоставимость результатов, но у системы

Harshaw выделен ряд преимуществ, такие как: возможность определения дозы от бета-излучения $H\beta(0,07)$ в коже одновременно с $H\beta(10)$ облучения всего тела, высокая скорость измерения (40 секунд один двухэлементный детектор), долговременное использование дозиметрических детекторов благодаря защите от различных повреждений с помощью тефлоновой подложки.

Материалы и методы

Для эксперимента использовалась автоматизированная термолюминесцентная система Harshaw 6600 Lite с дозиметрами 0110/8814, которые представляют собой детектор с двумя термолюминесцентными элементами, изготовленными из LiF(Mg,Ti), предназначенными для измерения $H\beta(0,07)$ бета-излучения в коже и $H\beta(10)$ гамма-излучения всего тела [6].

Опытным путем установлено, что сумма показаний трех термолюминесцентных дозиметров, измеренных последовательно в течение трех месяцев, не равна показанию дозиметра, который измерили в конце этих трех месяцев. Стоит отметить, что на значение индивидуального эквивалента дозы может повлиять множество факторов, например, загрязненность детекторов; кроме того, при воздействии на детектор повышенной освещенности возникает фотолюминесценция, а также при механических воздействиях триболюминесценция и хемилюминесценция [7].

Из партии дозиметрических детекторов модели 0110 Harshaw отобраны случайным образом 120 детекторов, отжиг дозиметров производился 31.01.2024, последний день замера 13.05.2024. В помещении, где проводился эксперимент, фон составлял в среднем 0,19 мкЗв/ч. Измерения фона производились прибором МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКГ-05.

Определение оптимального времени между отжигом и измерением термoluminescentного дозиметра 0110 Harshaw

В рамках эксперимента поставлена цель установления времени, необходимого для выдержки дозиметра перед измерением. В течение трех месяцев три раза в неделю производились измерения трех дозиметрических слайдов 0110 Harshaw. Затем рассчитывались показания фона в помещении на данный момент времени и производилось вычитание фоновых значений из измеренных. Из трех полученных значений вычислялось среднее.

Обработка производилась в предположении, что измеренные величины подчиняются нормальному закону распределения. Доверительная вероятность принималась равной 0,95.

Из расчета фона на основании измерения прибором МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКТ-05 мощности амбиентного эквивалента дозы ожидается, что наклон (мощность дозы) будет $0,0046 \pm 0,0009$ мЗв/сутки. По результатам измерения индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ от гамма-излучения без вычета фона был получен результат $0,00344 \pm \pm 0,00025$ мЗв/сутки (рис.1). Если вычесть фон

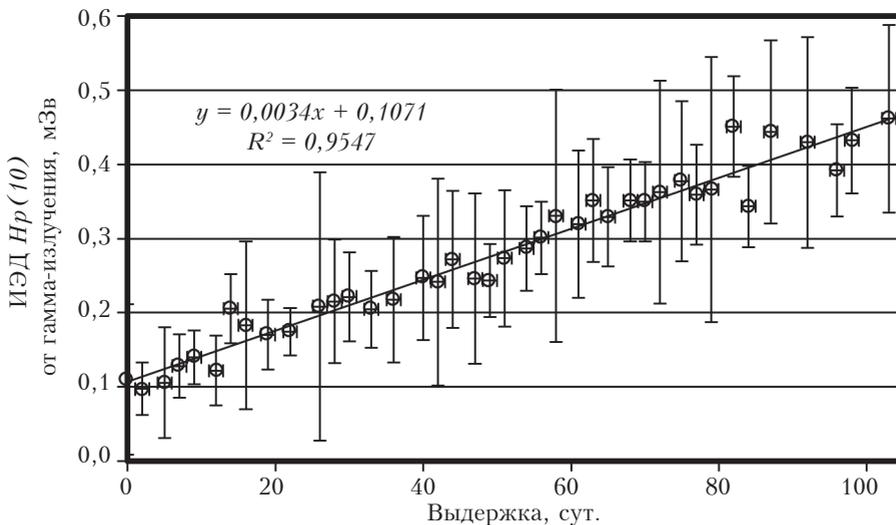


Рис.1. Показания дозиметров в зависимости от времени выдержки.

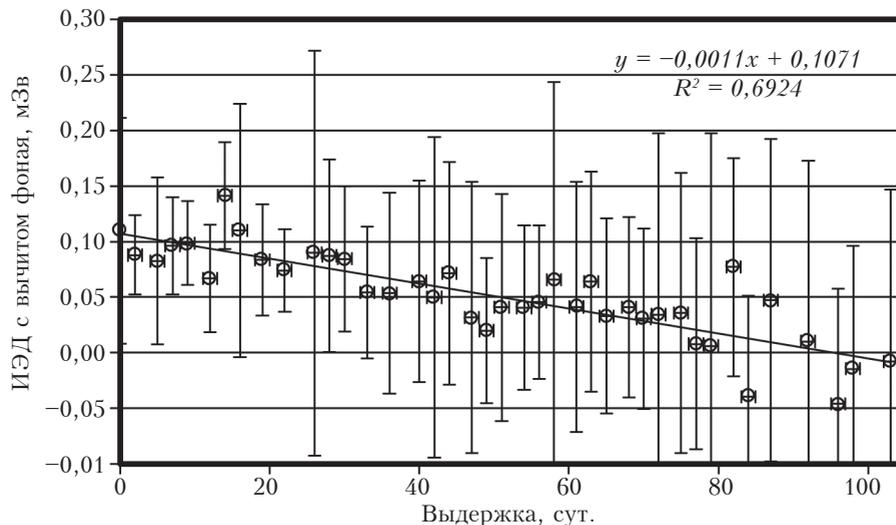


Рис.2. Зависимость показаний дозиметров после вычета фона от времени выдержки.

из измеренного значения, то можно сказать, что «собственная доза» у дозиметра 0110 спадает со скоростью $0011 \pm 0,0009$ мЗв/сут.

Значения ИЭД с каждым месяцем увеличивается, это объясняется тем, что дозиметры лежали в помещении с фоном, равным $0,19$ мкЗв/ч, соответственно в течении месяца накопили в себе некоторую дозу. Также видно, что значения ИЭД у только что отожженных дозиметров равны не нулю, а составляют порядка $0,1$ мЗв.

Далее из показания дозиметров поточечно вычитался фон. Результаты приведены на рис.2.

На рис.2 видно, что чем позже проводятся измерения, тем больше точки приближаются к нулевому значению. Таким образом, экспонирование (под экспонированием понимается выдерживание дозиметров некоторое время при фоновых значениях мощности дозы без выдачи персоналу) дозиметрических слайдов в течение трех месяцев необходимо для того, чтобы накопить достаточное количество информации о полученной дозе и получить более точные результаты измерений.

Доверительные интервалы получаются достаточно большими, так как основная погрешность МКС-1117М с блоком детектирования БДКГ-05 составляет 20%, а для ТЛД – 15%. Но точечные значения образуют нисходящий тренд, о чем говорит достаточно большой коэффициент детерминации ($0,69$), что маловероятно при случайном наборе данных. Также маловероятно нахождение практически всех значений ниже первого значения; ожидается, что при отсутствии зависимости показания ТЛД с вычетом фона были бы равномерно распределены в пределах доверительного интервала для первого значения по обе стороны. Из этого делается вывод, что корреляция, представленная на рис.2, действительно присутствует и не является результатом погрешности приборов и измерений.

По результатам первого месяца можно сделать вывод, что только что отожженные дозиметрические детекторы не имеют нулевого значения, даже с учетом фоновых значений ИЭД $Hr(10)$ не равен нулю. Важно отметить, что согласно НРБ-99/2009 для женщин репродуктивного возраста необходимо контролировать эквивалентную дозу внешнего облучения на нижней части живота каждый месяц. Таким образом, если «свежеотожженные» дозиметрические детекторы репродуктивные женщины носят в течение месяца, то помимо доз, которые они получили при работе с техногенными источниками ионизирующего излучения, измеренный ИЭД включает «остаточные» дозы из-за того, что элемент ТЛД имеет «хвост», который при отсутствии набора дозы интерпретируется оборудованием как набранная доза.

Сразу после отжига дозиметрических слайдов 31.01.2024 произведен замер этих же детекторов. На рис.3 представлена кривая свечения одного из детекторов.

На рис.3 видно, что кривая свечения не имеет выраженного пика, но стоит отметить, что «свежеотожженный» дозиметр не должен иметь пика высвечивания. Результаты измерения $Hr(10)$ показывают, что индивидуальный эквивалент дозы гамма-излучения составляет $100,5$ мкЗв, но в теории после отжига результаты измерения должны быть равны 0 мкЗв. Далее проанализирована кривая свечения, замер которой проводился 01.03.2024 (в конце первого месяца) (рис.4).

На рис.4 видно, что в конце первого месяца начинает проявляться пик, интенсивность которого растет и составляет около $2,25$ нА. На кривой свечения наблюдается «хвост», который по интенсивности примерно в 2 раза меньше информативного пика. Выдвинуто предположение: «наброс доз» связан с тем, что «хвост» входит в светосумму из-за того, что форма Гаусса определяется некорректно.

Стоит отметить, что «наброс доз» для партии дозиметров, время экспонирования для которых составляет один месяц, неодинаков: в ходе эксперимента выявлено, что возможны «набросы» за месяц в диапазоне от 0,1 мЗв до 1 мЗв. Если бы величина «наброса» была одинакова и равномерна для всей партии, ее можно было бы отсечь за счет вычитания фоновой составляющей (результатов измерений фонового дозиметра из этой же партии). В связи с неравномерностью искусственного завышения в одной партии становится невозможно корректно отсечь «наброс» доз.

Выдвинута гипотеза, что «наброс доз» для одного дозиметра постоянный, тогда возможно найти величину «наброса доз» для каждого дозиметра и вычитать ее при последующих измерениях. Проведенные эксперименты дали отрицательный результат, то есть при каждом измерении одного и того же дозиметра величина «наброса доз» за месяц была различной. Таким образом, даже для одного дозиметра нельзя отсечь составляющую, связанную с «набросом доз».

На втором месяце экспонирования термoluminesцентного дозиметра значения индивиду-

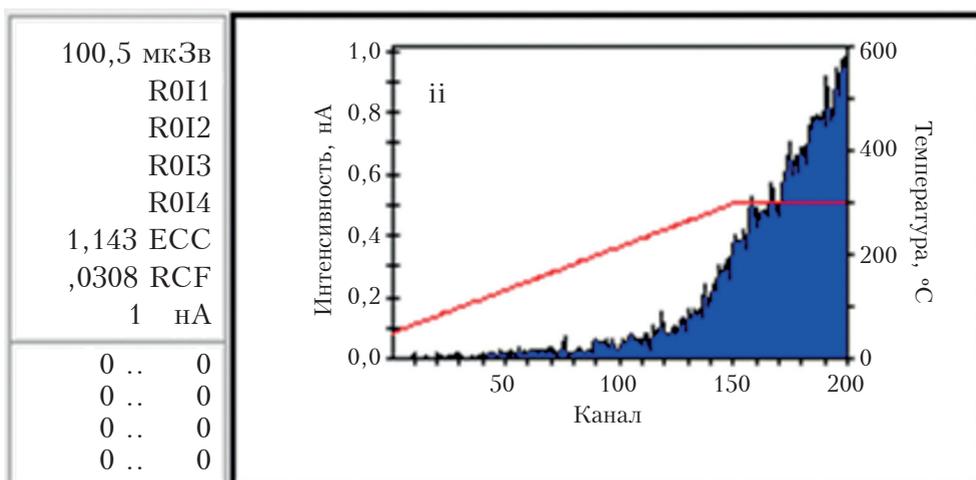


Рис.3. Кривая свечения слайда в первый день эксперимента.

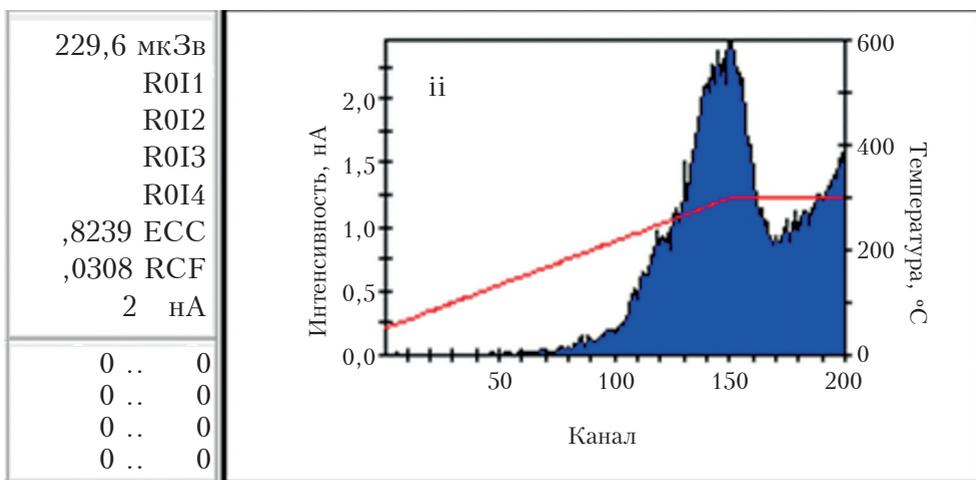


Рис.4. Кривая свечения слайда в конце первого месяца.

ального эквивалента дозы с вычетом фонового значения стали меньше примерно в два раза, но также отличны от нуля. По результатам третьего месяца измерений термолюминесцентных дозиметров наблюдаются нулевые значения индивидуального эквивалента дозы в 84, 96 и 98 день измерения за вычетом фона, после 90-го дня измерения значения индивидуального эквивалента дозы близятся к нулю с учетом фоновой составляющей.

На рис. 5 и 6 представлены замеры в конце второго и в конце третьего месяца.

С увеличением времени выдержки дозиметров возрастает площадь информативного

пика при практически неизменной величине «хвоста». Начиная с конца второго месяца увеличивается значение интенсивности пика, он становится более отчетливым, ровным, увеличивается соотношение пик-«хвост». Информативные пики после 2–3 месяцев выдержки хорошо описываются формой Гаусса.

В рамках эксперимента проверена гипотеза о возможном недостаточном отжиге индивидуальных дозиметров, который мог бы быть причиной завышенных значений индивидуальных доз. Проведены эксперименты по многократному отжигу детекторов, которые показали, что пятикратный отжиг одного детектора

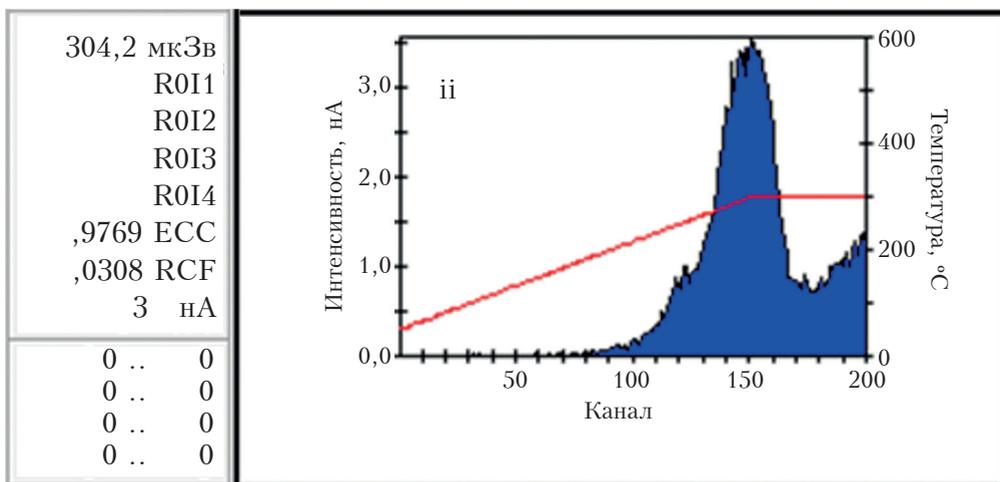


Рис.5. Кривая свечения слайдов в конце второго месяца.

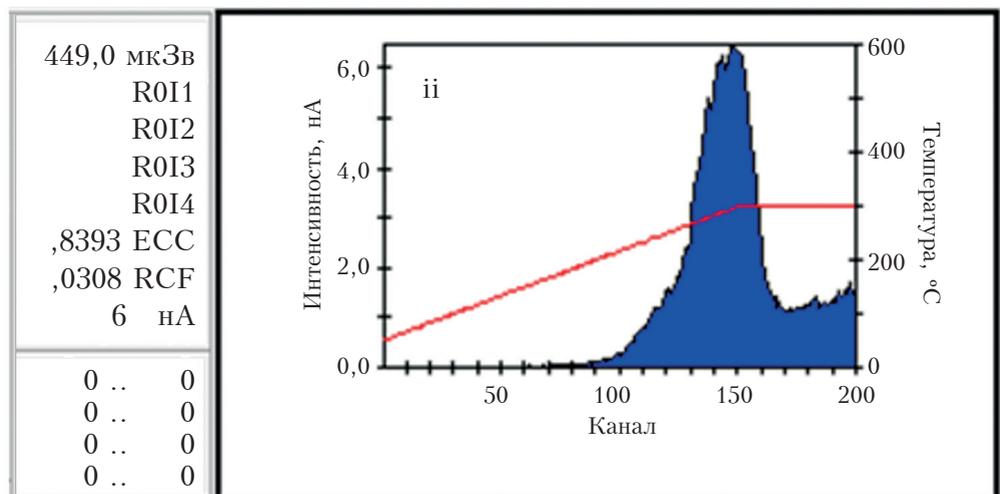


Рис.6. Кривая свечения слайда в конце третьего месяца.

приводит к незначительному уменьшению набранной дозы. На рис.7–11 представлены результаты пятикратного отжига одного детектора индивидуального дозиметра.

При анализе данных на рис. 7–11 можно сделать вывод, что пятикратный отжиг приводит к незначительному уменьшению «наброса» дозы: с 35 до 25 мкЗв. Таким образом, многократный отжиг не устраняет проблему полностью. Данный «наброс» дозы можно связать со считыванием информации не только из информационного пика, который отсутствует на рис. 7–11, а также из «хвоста» (крайние правые значения).

Стоит заметить, многократный отжиг создает дополнительную проблему, связанную с ресурсом использования индивидуальных дозиметров. Рекомендуемое количество отжигов – 500 раз, пятикратный отжиг сократит количество циклов использования в 5 раз.

Таким образом, наиболее оптимальным решением для получения результатов измерения индивидуального эквивалента дозы от гамма-излучения без «наброса» доз является длительное экспонирование дозиметров до их выдачи, что позволит уменьшить влияние случайных колебаний уровня фона на результаты измерений.

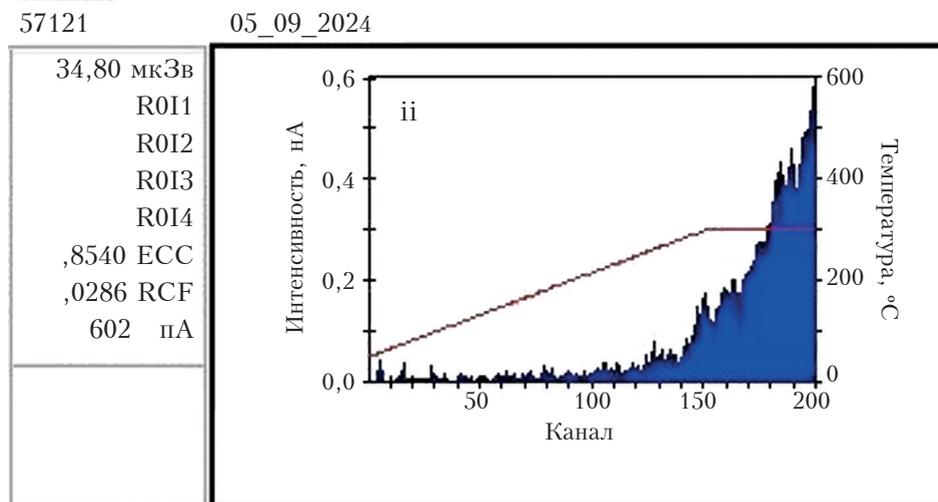


Рис.7. Первый отжиг индивидуального дозиметра.

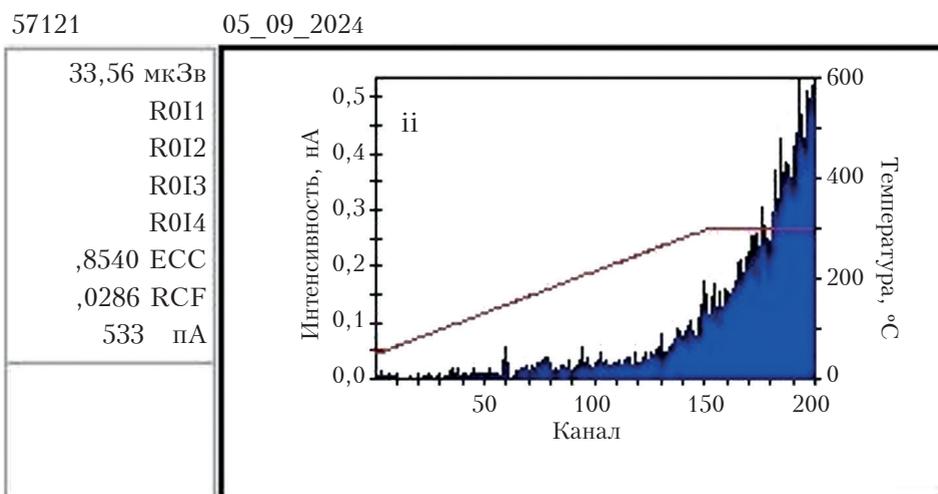


Рис.8. Второй отжиг индивидуального дозиметра.

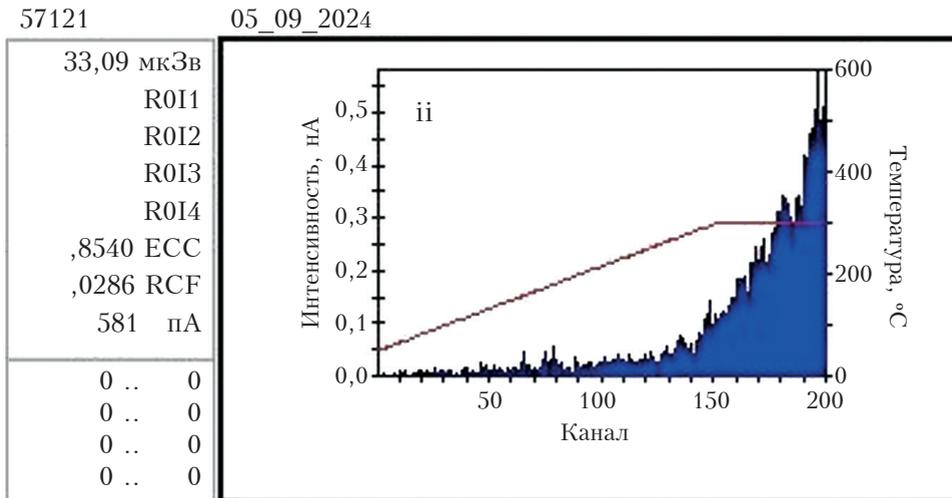


Рис.9. Третий отжиг индивидуального дозиметра.

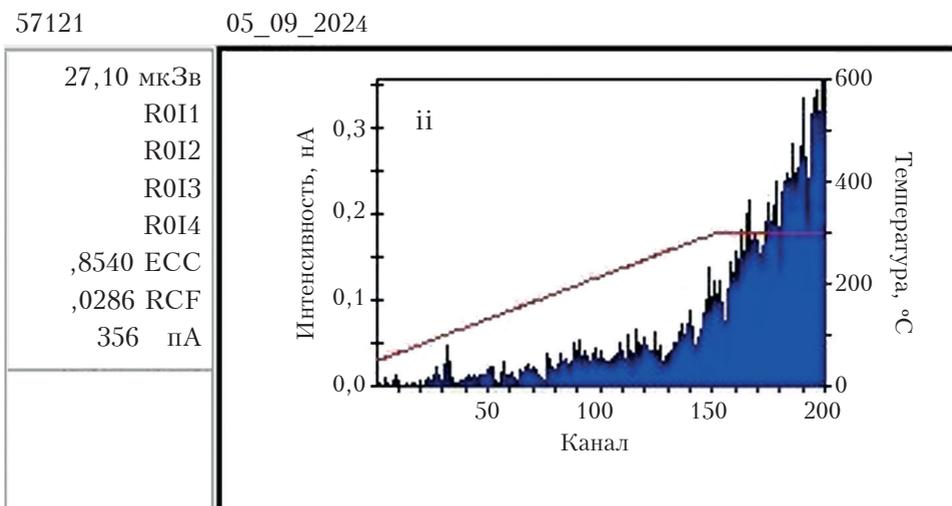


Рис.10. Четвертый отжиг индивидуального дозиметра.

Стоит отметить, что выдерживание дозиметров дольше трех месяцев нерационально, так как «наброс доз» близится к нулю и отмечается хорошая сходимость данных ТЛД-измерений с результатами измерений прямопоказывающих дозиметров.

Заключение

В ходе работы с автоматизированной термолюминесцентной дозиметрической системой Harshaw обнаружено, что результаты измерения ИЭД «свежеотожженного» дозиметра

не равны нулю. На основании этого проведен эксперимент по определению оптимального времени между отжигом и измерением термолюминесцентных дозиметров 0110 Harshaw.

С учетом вычитания фона опытным путем показано, что значения индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ гамма-излучения снижается в течение трех месяцев. Чем дольше выдерживается дозиметр, тем отчетливее на кривой свечения выявляется пик интенсивности, увеличивается различие в соотношении пик-«хвост».

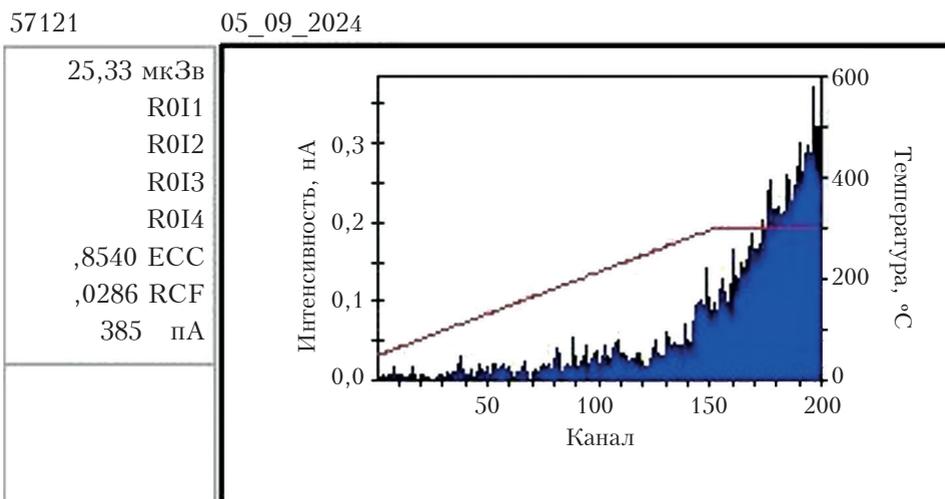


Рис.11. Пятый отжиг индивидуального дозиметра.

В качестве временного решения проблемы «наброса доз» при ежемесячном измерении эквивалентной дозы нижней части живота у репродуктивных женщин можно предложить выдерживать дозиметры два месяца и выдавать на третий. Выдача дозиметров на три месяца с последующим вычислением среднего значения индивидуальной эквивалентной дозы за один некорректно для контроля эквивалентной дозы на поверхности нижней части живота женщин репродуктивного возраста, так как не учитывает возможную неравномерность набора месячной дозы в течение трех месяцев. В один месяц женщина до 45 лет, например, может отбирать пробы и набрать 1,5 мЗв, а в последующие месяцы практически не работать с источниками ионизирующего излучения и набрать маленькое значение ИЭД. Рассчитывая среднее значение за три месяца, нет возможности отследить, какую дозу репродуктивная женщина набрала за каждый месяц и есть ли риск превышения основных пределов доз НРБ-99/2009.

Анализ кривых высвечивания показывает, что система обработки воспринимает неинформационный пик (крайние правые значения) как информационный пик. При увеличении пло-

щади информационного пика данный эффект уменьшается и становится незначительным. Таким образом, одним из решений может быть изменение областей обработки для корректного распознавания информационного пика.

Если предложенная процедура невозможна или не даст результатов, можно предложить провести дополнительные исследования. Провести исследования по контролируемому набору доз от источников ионизирующего излучения с целью выявления зависимости остаточного «наброса доз» от полученной дозы (сейчас 3 месяца фоновой выдержки, что приблизительно равно дозе 0,4 мЗв, хватает, чтобы исключить эффект «наброса доз»). Если будет выяснено, что контролируемое облучение нивелирует эффект наброса доз, то можно облучать дозиметры на точно определенное значение перед их выдачей, а при измерениях вычитать эту составляющую.

Если все вышеперечисленные меры не дадут результата, то необходимо придумать принципиально новый метод измерения эквивалентной дозы нижней части живота у репродуктивных женщин.

Метод многократного отжига дозиметров также не является решением проблемы, так как

экономически невыгоден. При таком способе снижения влияния «наброса» доз цикл использования детекторов сокращается в 5 раз.

В качестве временной меры предложенная выдержка на два месяца не должна привести к серьезным экономическим последствиям, так как обычно на предприятиях число женщин репродуктивного возраста (до 45 лет) группы А относительно мало, то есть количество необходимых дополнительных дозиметров также будет невелико. Таким образом, существенного удорожания процесса ведения индивидуального дозиметрического контроля не должно наблюдаться.

Важно отметить, что помимо времени выдержки дозиметра существует множество факторов, которые также могут внести вклад в значение индивидуального эквивалента дозы, например, если на детектор попали частички пыли, которые дадут вспышку света и будут восприняты считывателем, как световспышка от элемента детектора. Еще одним фактором может являться загрязнение

материала детектора секретом солевых желез, что аналогично пыли даст световспышку при нагревании детектора. Ограничение вклада влияния вышеперечисленных факторов осуществляется за счет использования корпуса детектора. При неаккуратном обращении с дозиметрическими детекторами, не поддержании условий измерения, установленных в технической документации (повышенная температура и влажность) на результаты измерения могут повлиять такие явления как: фотолюминесценция, триболюминесценция и хемилюминесценция. Кроме того, эквивалентные дозы на нижней части живота у женщин до 45 лет чаще всего находятся в пределах малых доз, которые могут быть ниже предела регистрации ТЛД в 100 мкЗв. Следует учесть, что если набранная доза меньше или близка к пределу регистрации, то результаты измерения могут оказаться некорректными, и при обработке появятся завышенные результаты ИЭД $H_p(10)$ гамма-излучения.

Литература

1. Нормы радиационной безопасности (СанПиН 2.6.1.2523-09). Официальное издание. Утверждены главным государственным санитарным врачом Российской Федерации от 07.07.2009. Введены в действие 1 сентября 2009. М., 84 с.
2. Москвина Н.А., Батухтина О.Н., Шевченко Е.В., Давыдовская А.М., Полева А.Ю. Применение термолюминесцентных детекторов для радиационно-гигиенического контроля // Медицинская физика. 2011. № 4(52). С. 64-69.
3. Кайдановский Г.Н., Пирогова Е.Н. Пути повышения точности и достоверности оценки индивидуальных доз персонала термолюминесцентным методом // Радиационная гигиена. 2012. Т. 5, № 2. С. 41-47.
4. K.J. Velbeck, L.Z. Luo and K.L. Streetz, «Type testing the model 6600 plus automatic tld reader», *Radiation Protection Dosimetry*, 2006, vol. 120, no. 1-4, pp. 303-306.
5. Ким Д.С., Нуртазин Е.Р. О некоторых термолюминесцентных системах индивидуальной дозиметрии внешнего радиоактивного облучения // Мир измерений. 2017. №4. С. 24-29.
6. Описание типа средств измерений. Системы термолюминесцентные дозиметрические автоматизированные Harshaw моделей 6600, 6600 lite. Приложение к свидетельству № 42135 об утверждении типа средств измерений – 10 с.
7. Дозиметрия. Определение индивидуальной эффективной дозы нейтронного излучения. Методические указания (МУ 2.6.5.052-2017). Официальное издание. Утверждены главным государственным санитарным врачом ФМБА Российской Федерации от 11.10.2017. Введены в действие с момента утверждения. М., 103 с.

Determination of the Optimal Time for the Use of Thermoluminescent Dosimeters when Conducting Individual Dosimetric Monitoring Using the Harshaw Thermoluminescent Dosimetric Automated System

Kovalenko Arina (branch of JSC Rosenergoatom Concern Leningrad Nuclear Power Plant, Sosnovy Bor, Russia)

Balachkov Maksim, Yurchenko Elena (National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk Polytechnic University, TPU, Tomsk, Russia)

Abstract. An experiment of measuring of the dose accumulation rate of 120 Harshaw slides type 0110 over three months was conducted. It was revealed that the results of measuring the accumulated dose after annealing the dosimeter are not equal to zero, but are about 0,1 mSv. Subsequent daily measurements of other dosimeters showed that the dose rate was about $0,00344 \pm 0,00025$ mSv/day, which does not correspond to the dosimeter-radiometer MKS-AT1117M readings of $0,0046 \pm 0,0009$ mSv/day. It has been suggested that it is necessary to take into account the identified effect when determining the individual dose equivalent of external irradiation to the lower abdomen for women of reproductive age or to use a fundamentally new method for determining this value.

Keywords: *thermoluminescent dosimeter, individual dosimetric control, individual dose equivalent.*

А.А.Коваленко¹ (инж.), М.М.Балачков² (зав.лаб.), Е.А.Юрченко² (инж.)

¹ Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ленинградская атомная станция», г. Сосновый бор Ленинградской обл.

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Контакты: тел. +7 (923) 482-64-88; mtmb2@tpu.ru.

Особенности изготовления кремниевых поверхностно-барьерных детекторов для радиометров радона

В статье предложена усовершенствованная технология изготовления поверхностно-барьерных детекторов (ПБД) на кремнии *n*-типа проводимости, приспособленная для изготовления ПБД, используемых в радиометрах радона. Детекторы имеют светозащиту, стабильные в принятых условиях эксплуатации характеристики, оптимально отвечающие требованиям для работы в приборе. Технология позволяет обеспечить высокий выход годных счетчиков, что снижает их себестоимость. Показана возможность изготовления ПБД на тонких кремниевых пластинах, забракованных для дальнейшего применения в планарной технологии.

Ключевые слова:

поверхностно-барьерные детекторы (ПБД), кремний, краевой эффект, выпрямляющий контакт, вольт-амперные характеристики (ВАХ), альфа-спектрометрия, светозащита, пиридин, теорема Шокли-Рамо.

С.И.Лашаев, А.Р.Третьяков

АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»,
Санкт-Петербург

В АО «Радиевый институт» им. В.Г. Хлопина в течение более 25 лет занимались разработкой и изготовлением кремниевых поверхностно-барьерных детекторов (далее по тексту – ПБД) для радиометров радона на кремнии обоих типов проводимости. Опыт работы по изготовлению лабораторных образцов кремниевых ПБД в институте имеется с конца 60-х гг. Технология их изготовления в общих чертах описана в ранних обзорных работах [1,2]. Несмотря на более, чем полувековую историю развития технологии ПБД, она и сегодня не исчерпала свой потенциал, сохранив, в том числе, и научный интерес [3]. С начала 80-х гг. в институте активно велись работы по совершенствованию технологии с целью ее адаптации для мелкосерийного производства, что послужило успешным началом передачи технологии в Рижский научно-исследовательский институт радиоизотопного приборостроения (РНИИРП).

В конце 80-х гг. стало возможно изготовление детекторов с выпрямляющим контактом на основе имплантированного бора (для кремния n-типа проводимости) и с защитой края перехода термическим окислом кремния, что позволило получать структуры с лучшими электрическими и шумовыми характеристиками. Однако для счетчиков площадью более 10 см² эти преимущества нивелируются емкостными шумами (возникающими при использовании зарядочувствительных предусилителей), что приводит к отсутствию выигрыша по энергетическому разрешению, по сравнению с ПБД. Кроме того, описанная выше промышленная технология изготовления детекторов (планарная) требует дорогостоящего оборудования, что значительно повышает стоимость счетчиков, особенно в случаях небольших серий, что наблюдается при выпуске радиометров (из нашего опыта – около 100 шт. в год), поэтому поверхностно-барьерная (далее по тексту – ПБ) технология не потеряла свою актуальность и на сегодняшний день. Основная причина востребованности ПБД для радиометров – это их себестоимость по сравнению с планарной технологией, что дает существенный вклад в цену прибора.

В настоящее время в стране имеется дефицит детекторного кремния, что делает актуальным поиск альтернативных решений. Одним из таких решений может стать использование кремниевых пластин, отбракованных для дальнейшего применения в промышленной планарной технологии. Обычно такие пластины отбраковываются после химико-динамической полировки из-за наличия дефектов на поверхности. Однако их использование для детекторных целей могло бы решить проблему дефицита кремния при минимальных затратах, а также подтвердить актуальность и эффективность ПБ-технологии.

Требования к счетчикам для радиометров

Специфическими требованиями к детекторам для радиометров являются: светозащищенность, стабильность характеристик и надежность работы в условиях естественной окружающей среды (влажность, состав атмосферы, температура и т. д.) [4]. Основные технологические приемы изготовления ПБД большой площади (более 10–20 см²) представлены в работе [5]. В последние годы достигнут определенный прогресс в изготовлении ПБД большой площади с высокими электрическими и спектрометрическими характеристиками [6,7], что во многом связано с использованием более качественных пластин кремния большого диаметра (более высокоомного, однородного, менее дефектного, с большими временами жизни носителей). Однако для радиометров приведенные в статьях характеристики счетчиков являются избыточными, при этом описанная авторами технология не приспособлена в полной мере к использованию для изготовления ПБД с перечисленными выше специфическими требованиями для мелкосерийного производства радиометров. Для выполнения этой задачи было предложено усовершенствование традиционной технологии изготовления ПБД.

Материалы и оборудование

В качестве исходного материала для изготовления детекторов использовался монокристаллический кремний, произведенный в конце 80-х гг. на Запорожском титаномагниево-комбинате (ЗТМК) и на Подольском химико-металлургическом заводе (ПХМЗ), также, для сравнения, был опробован кремний фирмы Wacker. Существенных различий в параметрах счетчиков из кремния в зависимости от изготовителя не наблюдалось. Основными требованиями к характеристикам исходного материала являются: удельное сопротивление

от 1 до 2-х кОм/см (измерялось 4-зондовым методом), время жизни неосновных носителей не менее 200 мкс (метод измерения – модуляция электропроводности), отсутствие дислокаций (бездислокационный кремний), и, как правило, с ориентацией поверхности [5]. Все эти параметры зафиксированы заводом-изготовителем в паспорте на слиток кремния.

В дальнейшем контрольных измерений перед изготовлением счетчиков не проводилось.

Однако в кремнии присутствуют электрически неактивные примеси (кислород, углерод, водород и т. д.), концентрации которых, как правило, не отражаются в паспорте на материал, а также могут присутствовать несовершенства монокристаллической структуры (кроме дислокаций), например, микродефекты.

В редких случаях, когда характеристики счетчиков, выполненных по уже хотя бы частично отработанной технологии, не воспроизводились на выбранном материале – он подлежал замене, после чего продолжалось дальнейшее совершенствование технологии на другом подходящем слитке кремния.

При изготовлении счетчиков определяющее значение имеет чистота процессов, связанных с химической обработкой кремниевых пластин. Все используемые химические реагенты (концентрированные азотная, плавиковая кислоты, органические растворители и т. д.) должны иметь марку ОСЧ. Особое значение имеет качество водоподготовки для финишной промывки пластин. Нами использовалась вода после бидистиллятора с последующим пропусканием через кварцевую ионообменную колонку со смесью анионита и катионита.

Для создания на пластинах кремния металлических контактов использовалось термическое напыление в вакууме на промышленной установке УВР-3М (1972 г. выпуска) с обязательным использованием азотной ловушки для паромасляного насоса. Все применяемые металлы (золото, палладий, серебро, алюми-

ний) должны иметь максимально достижимую степень чистоты.

Все работы проводились в обычных лабораторных помещениях, но с приточно-вытяжной вентиляцией через фильтры. Этого было достаточно для изготовления счетчиков с высокими параметрами и воспроизводимыми характеристиками.

Способы совершенствования технологии ПБД

В работе [5] впервые было показано, что в традиционной ПБ технологии токи утечки, как правило, практически полностью обусловлены краевым эффектом и более, чем на порядок, превышают остальные компоненты обратного тока, и в случае «устранения» краевого эффекта обратный ток ПБД будет иметь величину, характерную для планарной технологии, тем самым дана численная оценка вклада краевого эффекта в ток утечки, в отличие от более ранних работ, в которых отмечался лишь существенный вклад края ПБ структуры в обратный ток [8]. Другими словами, если удастся «преодолеть» краевой эффект, то ПБ технология по этому параметру может конкурировать с планарной (токи порядка 10 нА/см^2 при рабочих напряжениях несколько десятков вольт). Хотя к ПБД для радиометров не предъявляется жестких требований по токам утечки (приемлем ток 1–2 мкА, т. к. шумовые характеристики в большей степени будут определяться большей емкостью детектора), край выпрямляющего перехода будет влиять и на другие эксплуатационные характеристики (надежность, долговечность, стабильность параметров), в том числе и на выход годных детекторов, т. е. на их себестоимость. Поэтому основной упор в совершенствовании технологии ПБД делается на краевую область.

Прежде всего, из двух возможных вариантов защиты края перехода компаундом

(в нашем случае КЭН-2), один из которых выполняется до напыления выпрямляющего контакта, а второй – после напыления контакта. Нами был выбран второй вариант, несмотря на то, что первый вариант дает в несколько раз более низкие токи утечки. Преимущество второго варианта, во-первых, заключается в том, что при такой последовательности герметизации упакованный в стеклотекстолитовую оправку детектор менее восприимчив к механическим воздействиям, а главное – после напыления выпрямляющего контакта до защиты края перехода мы можем отбраковать структуры с неудовлетворительными электрическими характеристиками (ток,

напряжение, шумы), а затем специальным, предложенным нами воздействием на край перехода [9], улучшить характеристики ПБД до приемлемых для работы в радиометре. Тем самым, нам удалось повысить выход годных ПБД до 80–90%.

Указанный результат достигается добавлением в определенной пропорции перед защитой края перехода в компаунд КЭН-2 пиридина, являющегося органическим соединением нуклеофильного типа, а также дозированной обработкой поверхности кремниевых пластин перед защитой края перехода в парах пиридина.

Влияние пиридина в составе компаунда особенно показательно для счетчиков с аномальными ВАХ, наблюдаемыми после напыления выпрямляющего контакта, что показано на примере обратных токов детекторов площадью 10 и 12 см² (табл.1 и рис.1) до защиты и после защиты края перехода компаундом КЭН-2 с добавлением пиридина по предлагаемому способу.

Улучшенные характеристики детекторов (токовые и шумовые) остаются стабильными в течение более 10 лет при хранении в комнатных условиях (в темноте) и при периодической работе в форвакууме и на воздухе, а также при их длительном использовании в радиометрах радона.

Создание заднего контакта

В случае травления кремниевых пластин с двух сторон следует обратить внимание на создание «омического» контакта. Лучшим омическим контактом в традиционной ПБ технологии является шлифованная задняя сторона пластины с нанесенным на нее металлом (химическим нике-

Табл.1. Влияние защиты компаундом с пиридином на обратные ВАХ детекторов с аномально высокими токами.

До защиты		После защиты	
U, В	I, мкА	U, В	I, мкА
0,6	0,86	2	0,5
3,6	5	6,8	0,6
13	15	26	0,8
50	33	64	1
		113	1,2

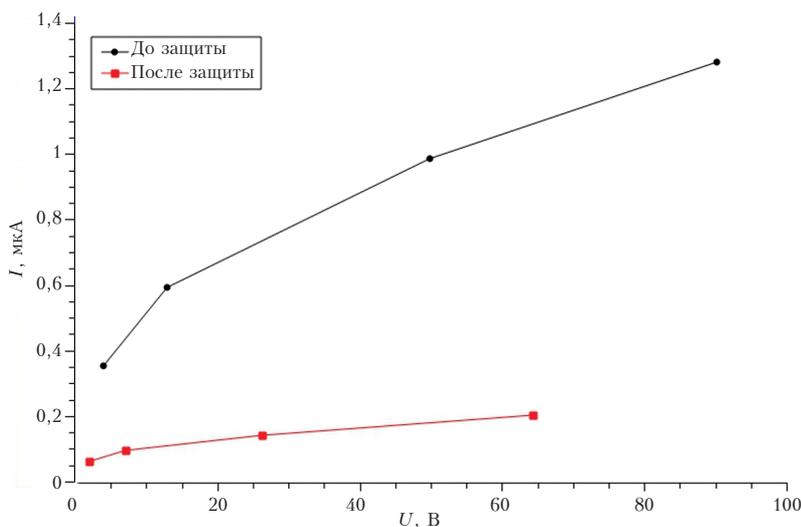


Рис.1. Улучшение обратных ВАХ после защиты компаундом с пиридином.

лированием, термическим напылением и др., и т. п.). Тип металла и способ нанесения слабо влияет на результат, обычно нами использовался для напыления алюминий.

Для упрощения технологии нами часто проводилось травление пластин с двух сторон (не требуется защита заднего контакта). В этом случае особенно тщательно, учитывая прогрев пластин после травления [10], следует относиться к промывке не только передней, но и задней стороны пластины после травления. Если это условие не выполняется, то на счетчиках с напыленным задним алюминиевым контактом, как правило, наблюдаются аномалии в виде сильного искажения альфа-спектра при облучении всей поверхности счетчиков альфа-частицами. Искажения, как правило, проявлялись в наличии интенсивных низкоэнергетических «хвостах», ухудшении энергетического разрешения (до 200 кэВ), либо в появлении ложных пиков, внешне напоминающих тонкую структуру плутония-238 (рис.2). То, что это контактное явление, доказывается улучшением формы спектра после стравливания алюминия и нанесения нового заднего контакта.

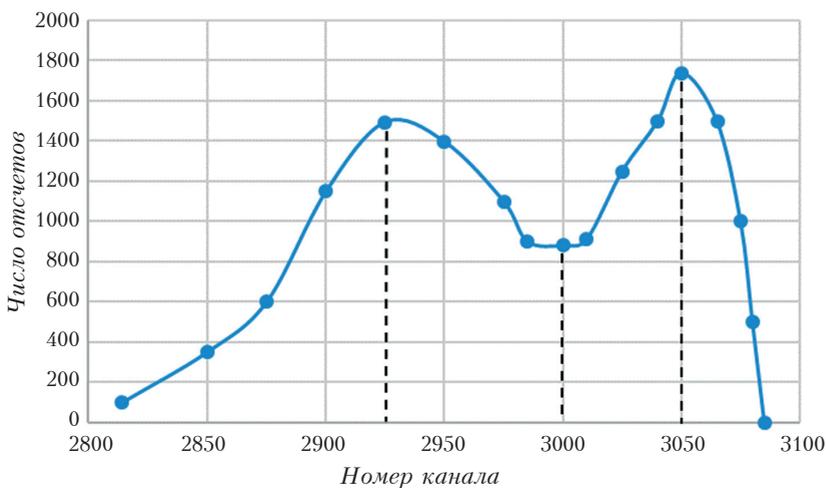


Рис.2. Искажение спектра альфа-частиц плутония-238 в случае алюминиевого заднего контакта, напыленного на травленную и прогретую поверхность кремния, при недостаточной промывке пластины.

В литературе не было найдено упоминаний о подобных спектральных искажениях, поэтому нами был предложен предполагаемый механизм наблюдаемого эффекта.

Предпосылкой для предполагаемого механизма является факт улучшения формы спектра при увеличении постоянной времени формирования в усилителе спектрометрического тракта (до 4 мкс и более). Визуально сигналы с детектора имеют передние фронты разной длительности в зависимости от места попадания альфа-частицы на чувствительные поверхности счетчика, что при дифференцировании сигнала после зарядочувствительного предусилителя в усилителе-формирователе приводит к разным амплитудам на входе амплитудно-цифрового преобразователя (АЦП), т. е. к искажению альфа-спектра. Далее можно предположить, что контакт термически напыленного алюминия с химически травленной поверхностью кремния неоднороден по площади и имеет мозаичную структуру промежуточного слоя между поверхностью кремния и алюминиевым электродом, что приводит к разбросу по электрическому сопротивлению различных участков в промежуточном слое.

В зависимости от места попадания альфа-частицы ее регистрация будет проходить при разном постоянном времени RC-цепочки, где R – сопротивление поверхностного слоя ограниченной площади между кремнием и алюминием (сопротивление счетчика при прямом включении обычно составляло несколько десятков кОм, емкость детектора при рабочем напряжении около 10 В – порядка 1000 пФ). В этом случае постоянная времени счетчика будет того же порядка, что и

время формирования сигнала в усилителе, тем самым разброс амплитуд, в зависимости от места попадания альфа-частиц, находит свое объяснение. Однако такой вывод не согласуется с учетом величины времени релаксации Максвелла, которое применяется для индуцированного в области электрода заряда:

$$T_M = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon}{\sigma}, \quad (1)$$

где σ – удельная электропроводность, диэлектрическая проницаемость среды (для кремния $\varepsilon \approx 12$), $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см, для кремния с уд. сопротивлением порядка 1 кОм·см это время составляет около 1 нс, что на три порядка меньше постоянной формирования в усилителе и разброс амплитуд, в зависимости от места попадания частицы, наблюдаться не может.

Другой подход для объяснения механизма регистрации излучения в полупроводниковых детекторах формулируется в теореме Шокли-Рамо, согласно которой механизм формирования сигнала в полупроводниковых детекторах базируется на понятии мгновенного тока, индуцируемого на данном электроде из-за движения электронов в области пространственного заряда (ОПЗ). В рамках этой теоремы, на наш взгляд, возможно проявление неоднородности по сопротивлению промежуточного слоя на заднем контакте детектора. Настоящая работа имеет технологический характер, поэтому здесь мы только качественно обозначаем пути возможного объяснения наблюдаемых эффектов.

Улучшение качества «омического» контакта для травленной поверхности кремния возможно при изменении порядка технологических операций: например, прогрев пластины до напыления выпрямляющего контакта, но с уже напыленным алюминиевым задним контактом. Нами в работе использовался один из возможных вариантов создания контакта: не изменяя последовательности операций, в качестве за-

дного контакта использовался алюминий с подслоем германия (толщиной 15–20 мкг/см²).

ПБД из отбракованных пластин кремния для планарной технологии

Из-за дефицита детекторного кремния большого диаметра возрастает интерес к использованию тонких кремниевых пластин (200–300 мкм), которые по своим параметрам соответствуют требованиям для детекторных материалов. Такие пластины, как правило, являются браком для применения в планарной технологии, например, из-за дефектов, возникающих на этапах производства или обработки. Это делает их значительно более доступными по цене, что, в свою очередь, снижает стоимость производства ПБД.

Для выяснения возможности изготовления ПБД на таких пластинах была сделана из них партия детекторов (10 шт.) площадью 10 см² (рис.3). Пластины кремния n-типа диаметром 42 мм вырезались из исходных пластин диаметром 100 мм и толщиной 200 мкм. Несмотря на то, что такие пластины подвергались химико-динамической обработке, для создания ПБ требуется дополнительное травление под барьер.

Счетчики после изготовления имели достаточно высокие электрические и спектрометрические характеристики (энергетическое разрешение не хуже 80 кэВ), которые вполне соответствовали требованиям для их применения в радиометрах. Однако после их хранения в комнатных условиях в течение месяца все счетчики показали аномально высокие шумы при смещениях менее 2-х вольт, при этом токи утечки остались без изменений до напряжения более 50 В. Вернуть шумы к величине, близкой к первоначальной, удалось за счет воздействия распределенного давления на обратную сторону пластины, величина которого была определена пошаговым подбором. Данный результат указывает на влияния

механических напряжений, возникающих при изгибе тонкой пластины, на шумовые характеристики перехода. Этот изгиб удалось компенсировать подобранной нагрузкой с обратной стороны пластины. Для предотвращения этого эффекта, возможно, требуется замена стеклотекстолитовых оправок на керамические, что используется в технологии западных фирм, либо изменение технологии герметизации края перехода и способа упаковки пластин в стеклотекстолит, включив операцию вклеивания пластины кремния по всей площади заднего контакта на стеклотекстолитовую подложку достаточной толщины.

Светозащита чувствительной поверхности детекторов

Специфическим требованием к счетчикам для радиометров является их светозащищенность, которая достигалась за счет термического напыления толстого (до 100 нм) многослойного металлического покрытия на чувствительную поверхность детектора. Для создания выпрямляющего контакта на химически травленную «под барьер» поверхность кремниевой пластины *n*-типа проводимости напылялся подслои из палладия (толщиной 10–20 нм). В качестве второго слоя использовалось золото (толщиной 20–40 нм). Эти металлы необходимы для создания ПБ. Подслой из палладия обеспечивает хорошую адгезию к кремнию [11], иначе толстые слои металла могут отслаиваться от поверхности. Достигать светозащищенности ПБД за счет толстого слоя золота менее предпочтительно по сравнению с некоторыми другими металлами, прежде всего из-за слабой отражательной способности пленок золота и достаточно высокого коэффициента пропускания (около 23%, при толщине пленок 40 нм) в видимом световом диапазоне, а также из-за значительного увеличения мертвого окна детектора (большой атомный номер золота) и повышенного расхода драгметалла.

Первым кандидатом на светозащитный слой, напыляемый толщиной около 100 нм, был выбран алюминий, ввиду его высокой отражательной способности, дешевизны, технологического удобства из-за его низкой температуры плавления для термического напыления, а также естественной пассивации пленки окислом алюминия, что важно при работе счетчиков на атмосфере. Однако напыления пленок алюминия неожиданно приводило к аномальной форме альфа-спектра, что выражалось в аномально большом уширении альфа-линий (до 200 кэВ, при сохранении ширины линии генератора менее 60 кэВ), а также в появлении интенсивных низкоэнергетических «хвостов», что внешне похоже на описанные ранее искажения спектров из-за проблем с задним контактом.

Предположительно, этот эффект связан с механическими напряжениями на поверхности кремния, которые возникают после напыления и окисления алюминия [12]. Возможным механизмом наблюдаемого эффекта является неоднородное по площади изменение зарядового состояния приповерхностной области кремния, ее рекомбинационных и других параметров за счет поляризации (пьезоэффект) находящейся на ней пленки естественного окисла, возникающего в процессе технологии, с учетом применяемого нами прогрева кремниевой пластины после травления [10].

Следует отметить возникновение, в некоторых случаях, искажения альфа-спектра, полученного на ПБД из *p*-кремния с алюминиевым выпрямляющим контактом, что отмечалось уже в первых работах, но объяснялось неоднородностью исходного *p*-кремния [13]. В некоторых случаях удавалось улучшить вид альфа-спектра после отжига детекторов на воздухе при температуре 100–120 °С в течение 2–4-х часов с последующим медленным охлаждением вместе с термостатом. Однако для полного описания физики наблюдаемого

результата требуется более глубокое исследование, что выходит за рамки данной работы.

В дальнейшем, учитывая проблемы с алюминиевым покрытием, оно было заменено на пленку из серебра (с толщиной 80–100 нм), которая обладает высокой отражательной способностью в видимом диапазоне (близко к 100%). Это позволило устранить искажение альфа-спектра и обеспечило стабильность спектральных и электрических характеристик счетчиков в течение многих лет эксплуатации и хранения детекторов в комнатных условиях.



Рис. 3. Внешний вид детекторов площадью 10 см.кв. для установки в посадочные гнезда радиометров.

Счетчики на р-кремнии

Для изготовления ПБД для радиометров также был опробован кремний р-типа проводимости, однако известная на сегодняшний день технология создания перехода с напылением алюминия на подслои из германия приводит к обратным токам в несколько раз выше, чем у счетчиков на п-кремнии, поэтому эта технология требует усовершенствования. Кроме этого, на отдельных образцах счетчиков из р-кремния периодически наблюдались аномалии альфа-спектров.

Заключение

В работе предложена технология ПБД большой площади (более 10 см. кв.) на кремнии п-типа проводимости, оптимизированная под использование детекторов в радиометрах радона. Основные усилия были направлены на уменьшение себестоимости, повышение надежности, обеспечение высокого выхода годных детекторов (при общем количестве счетчиков не менее 100 шт., изготовленных по усовершенствованной технологии, выход годных счетчиков составил не менее 80%). Для решения задачи по светозащите детекторов был предложен простой вариант дополнительного термического напыления слоя серебра на чувствительную поверхность детектора. В целях упрощения технологии применялось двухстороннее химическое травление пластин, что потребовало дополнительного внимания к созданию заднего «омического» контакта, в частности, к более тщательной и однородной промывке пластины с задней стороны и использования для заднего контакта алюминия с подслоем из германия.

Показана возможность использования в качестве исходного материала для счетчиков тонких (до 200 мкм) кремниевых пластин, не пригодных для дальнейшего использования в промышленной планарной технологии, что важно на сегодняшний день в связи с дефицитом отечественного детекторного кремния. В этом варианте мы с неизбежностью имеем химически травленную с двух сторон кремниевую пластину, что требует особого внимания при создании заднего контакта по выше предложенному способу.

Литература

1. Дирли Дж., Нортроп Д. Полупроводниковые счетчики ядерных излучений. Пер. с англ. Под ред. Вавилова В.С. М.: Мир. 1966.
2. Акимов Ю.К., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф., Юнгклауссен Х. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение. Под ред. канд. физ.-мат. наук Акимова Ю.К. М.: Атомиздат, 1967. 255 с.
3. Салохина М.М. Исследование эффекта понижения высоты барьера в ПБД ядерных излучений на основе структуры золото–кремний. Диссертация на соискание канд. физ.-мат. наук. ИЯИ, 2005, Москва.
4. D. Torrieri. The radiometer and its practical implementation. 2010-MILCOM 2010 Military communications conference, ieee, 2010. pp. 304-310.
5. Лашаев С.И. Кремниевые ПБД большой площади и сложной конфигурации. Диссертация на соискание канд. техн. наук. Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, 1986, Ленинград.
6. S.A. Radzhapov, R.Kh. Rakhimov, B.S. Radzhapov et al. «Development of a radiometer based on silicon detectors with a large sensitive area», *Computational Nanotechnology*, 2019. no. 1, pp. 65-68. (In Rus.).
7. Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Рахимов Р.Х. Особенности технологии изготовления кремниевых поверхностно-барьерных детекторов большой чувствительной рабочей площади для измерения активности естественных изотопов // *Computational Nanotechnology*. 2018. № 1. С. 151-154.
8. Зи. С. Физика полупроводниковых приборов в 2-х книгах. Перевод с английского: канд. физ.-мат. наук Гергеля В.А. и канд. техн. наук Ракитина В.В. под редакцией д-ра физ.-мат. наук Суриса Р.А. М.: Мир, 1984. Т. 1, 295 с.
9. Лашаев С.И. RU 2726994 С1, приоритет 2020.07.17.
10. Лашаев С.И. и др. Положительное решение по заявке № 3857078 от 29.12.1984.
11. Лашаев С.И., Соловьев С.М. А.с. №1.122.155, приоритет от 22.07.83.
12. Шугуров А.Р., Панин А.В. Механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях // *Журнал технической физики*. 2020. Том 90. Вып. 12. С. 1971-1994.
13. Кушнирук В.Ф., Никитина Р.А., Харитонов Ю.П. Поверхностно-барьерные детекторы из кремния р-типа: Способ изготовления и характеристики // *Объедин. ин-т ядерных исследований*. С. 13-6578. Дубна, 1972.

Features of Fabrication of Silicon Surface-Barrier Detectors for Radon Radiometers

Lashaev Sergey, Tretyakov Alexey (Radium Institute named after V.G. Khlopin JSC. V.G. Khlopin Radium Institute, St. Petersburg, Russia)

Abstract. In the article the improved technology of manufacturing of surface-barrier detectors (SBD) on silicon of n-type conductivity, adapted for manufacturing of SBDs used in radon radiometers, is proposed. The detectors have light protection, stable characteristics under the accepted operating conditions, optimally meeting the requirements for operation in the device. The technology makes it possible to provide a high yield of year-old counters, which reduces their cost price. The possibility of manufacturing PBDs on thin silicon wafers rejected for further use in planar technology is shown.

Keywords: *surface barrier detectors (SBD), silicon, edge effect, rectifying contact, current-voltage characteristics (CVC), alpha spectrometry, light protection, pyridine, Shockley-Ramo theorem.*

С.И.Лашаев (к.т.н., инж.), А.Р.Третьяков (инж.)

АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», г. Санкт-Петербург

Контакты: lashaev49@mail.ru, tretyakov.a.r@khlopin.ru.

Геохимические факторы, влияющие на содержание и миграцию естественных и техногенных радионуклидов в почвах Упоровского района Тюменской области

С санитарно-гигиенической точки зрения необходимо изучать не только химический состав почв (макро- и микроэлементы), но и содержание естественных и техногенных радионуклидов вне зависимости от техногенной нагрузки на территорию. В работе выделены и проанализированы зоны аккумуляции и рассеивания естественных и техногенных радионуклидов в профиле исследуемых почв агроценозов и условно фоновых темно-серых лесных почв, а также обозначен характер их взаимодействия с макро- и микроэлементами. Удельная эффективная активность естественных (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) и техногенных (^{137}Cs , ^{90}Sr) радионуклидов в профиле почв агроценозов и темно-серых лесных почв Упоровского района Тюменской области соответствует действующим нормам.

Ключевые слова:

естественные радионуклиды, техногенные радионуклиды, макроэлементы, микроэлементы, почвы, юг Тюменской области.

**Н.Е.Гурьев¹, А.В.Синдирева¹,
Н.С.Котченко², П.А.Андреев³,
П.Е.Ляпина¹**

¹ ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень

² ФГБУ ЦАС «Тюменский», г. Тюмень

³ ООО «Сервисная Нефтяная Компания», г. Тюмень

Все живое на земле подвергается естественному радиационному облучению. Естественный радиационный фон, как правило, не представляет опасности для живых организмов, но под влиянием деятельности человека данный фактор может существенно усиливаться. Помимо миграции радионуклидов вглубь почвы происходит их аккумуляция в растения через корневую систему. Различные травы, обогащенные радионуклидами, потребляемые живыми существами, в дальнейшем становятся источником внутреннего облучения организмов животных и, как следствие, людей [2].

Содержание естественных радионуклидов в почвах во многом обусловлено их наличием в почвообразующих породах. Почвы, развитые на кислых магматических породах, более обогащены радиоактивными элементами (ураном, радием, торием, калием), чем почвы, образованные на основных и ультраосновных породах [15]. Помимо почвообразующих пород, деятельность человека сопровождается выбросами радионуклидов в окружающую среду. Со второй половины XX в. начались испытания атомного оружия и впервые возникли аварийные ситуации на предприятиях атомной промышленности (Кыштымская авария 1957 г., Чернобыльская катастрофа 1986 г., авария на АЭС Фукусима-1 в 2011 г. и др.). При создании АЭС специалистам приходится учитывать социальные риски в области радиационной безопасности, приводящие к поражению населения в случае возникновения чрезвычайной ситуации. Наибольшему воздействию радиоактивного загрязнения подверглись территории после аварий на Чернобыльской АЭС (Чернобыльская зона отчуждения), ПО «Маяк» (Восточно-Уральский радиоактивный след), бассейн р. Теча, что является ярким примером социального и, в первую очередь, экологического риска [3]. Выпавшие на поверхностный слой почвы радионуклиды под влиянием хозяйственной деятельности и природных факторов мигрировали вглубь почвы, загрязняя значительные слои [7]. Исходя из данных ФГБУ «Тулаагрохимрадиология», максимальной плотностью загрязнения ^{137}Cs в диапазоне 37–185 кБк/м² обладают сельскохозяйственные угодья Плавского и Арсеньевского районов с преимущественным распространением черноземных и серых лесных почв [17].

В границах юга Тюменской области радиационно-экологический мониторинг проводится государственными органами исполнительной власти (ФГБУ ГЦАС «Тюменский», Росприроднадзор, ФГБУ по УФО по Тюменской области «ЦЛАТИ», ФГБУ Обь-Иртышское УГМС и др.). Результаты мониторинга представлены в ежегодных отчетах об экологической ситуации в границах Тюменской области. В рамках научно-исследовательской деятельности проведено несколько работ по изучению содержания радионуклидов в зональных и интразональных почвах [2,4,10]. Стоит отметить, что при всем объеме работ, сделанном авторами, вопрос о радиационно-геохимической связи естественных и техногенных радионуклидов с макро- и микроэлементами в различных типах почв юга Тюменской области до сих пор остается актуальным.

Задачи исследования

Объектом исследования были темно-серые лесные почвы Упоровского района юга Тюменской области.

При этом ставились следующие задачи:

- оценить содержание естественных и техногенных радионуклидов в поверхностном слое почв Упоровского района;
- определить содержание естественных (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) и техногенных (^{137}Cs , ^{90}Sr) радионуклидов в профилях темно-серых лесных почв Упоровского района Тюменской области;
- выделить факторы, влияющие на распределение естественных и техногенных радионуклидов в исследуемых почвах;
- выявить зоны аккумуляции и рассеивания естественных и техногенных радионуклидов в исследуемых почвах;
- определить взаимосвязь между естественными радионуклидами, макро- и микроэлементами в исследуемых почвах.

Материалы и методы исследования

С географической точки зрения территория исследования расположена в границах Упоровского района юга Тюменской области. Площадь распространения серых, светло- и темно-серых лесных типов почв составляет 891,2 тыс. га, при этом площадь серых лесных почв составляет 41,5%, светло-серых – 18,1%, темно-серых – 40,4%. В связи с географической распространенностью темно-серых лесных почв в границах территории исследования и, как следствие, использования их в сельскохозяйственных целях, изучение содержания радионуклидов естественного и искусственного происхождения является достаточно актуальным для данной территории [13].

Радиационно-геохимические работы проведены в летний полевой период 2024 года. Пробы почв были отобраны на пунктах экологического мониторинга ФГБУ ГЦАС «Тюменская» и фоновых участках Упоровского района. В табл.1, 2 представлены общие сведения об изучаемых типах почв. В процессе описания почв изучались: мощность горизонта, плотность, структура, механический состав, форма и степень выраженности границы горизонтов, реакция с соляной кислотой, включения и окрас по колориметрической системе Манселла (Munsell Soil Color Book).

Отбор проб производился каждые 20 см до подстилающей/материнской породы (до 1,5 м), масса отобранной пробы составляла 1 кг. Из отобранных образцов почв удалялись ветки, камни, корни растений и различный мусор. Отобранные пробы высушивались в естественных условиях при температуре воздуха 20 °С, после чего просеивались через почвенное сито с диаметром ячеек 0,5 мм. Количество отобранных для анализа проб по глубине профиля темно-серых лесных почв и почв агроценозов составило свыше 80, а поверхностного (пахотного) слоя почв – более 200 [15].

Лабораторный анализ проводился в два этапа: определение содержания естественных (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) и техногенных (^{137}Cs , ^{90}Sr) радионуклидов (далее ЕРН и ТРН), химический анализ. Определение содержания радионуклидов проводилось на спектрометрическом комплексе УСК «Гамма плюс». Радиационный фон до и после проведения измерения не превышал 0,08 мкЗв/ч [15]. В работе использованы данные химического анализа почв ФГБУ ГЦАС «Тюменская». Определение содержания основных макро- и микроэлементов проводилось в аккредитованной испытательной лаборатории с использованием действующих сертифицированных методик ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 и др. В отобранных образцах почв определены следующие химические элементы: калий (подвижная форма, п.ф.), медь (валовая форма, в.ф.), цинк (в.ф.), кобальт (в.ф.), марганец (в.ф.), железо (в.ф.), сера (в.ф.), свинец (в.ф.), никель (в.ф.), кадмий (в.ф.), а также гумус (органическая фракция) и рН [15].

Для сравнения полученных результатов исследования с действующими нормативными документами (ГОСТ 30108-94; ГОСТ 30108-94; СП 2.6.1.758-99; СанПиН 2.6.1.2800-10) были проведены расчеты удельной эффективной активности ЕРН (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) по формуле (1):

Табл.1. Общая информация.

Тип (подтип) почвы	Место отбора проб почв	Формула почвенного профиля		
		СССР (1977)	Россия (2004)	World Reference Base (2006)
Почва агроценоза. Темно-серая лесная	Площадка мониторинга (репер)	$A_{\text{пах}}+B+C$	AU+BEL+C	AU+BEL+C
Темно-серая лесная. Фоновая	Фон	A_0+A_1+B+C	AU+BEL+C	AU+BEL+C

Табл.2. Описание исследуемых почв.

Тип (подтип) почвы	Описание почвенных горизонтов по классификации и диагностике почв СССР (1977)
Почва агроценоза. Темно-серая лесная.	A_{пах} : мощность до 40 см, рыхлая, волнистая и постепенная граница, рыхлый, комковатой структуры, легко суглинистого механического состава, 10YR 2/1 (черный); B : мощность до 90 см, плотной, призмовидно-плитчатой структуры, среднесуглинистого механического состава, волнистой и постепенной границей, 10YR 4/4 (темновато-желтовато-коричневый); 10YR 2/1 (черный); C : мощность свыше 30 см, очень плотная, призмовидно-плитчатая структура, тяжело-суглинистого, глинистого механического состава, 2,5Y 7/3 (бледновато-коричневая). Реакция с соляной кислотой во всех почвенных горизонтах отсутствует.
Темно-серая лесная. Фоновая.	A₀ : мощность до 3 см, рыхлая, граница горизонта волнистая, переход резкий; A₁ : мощность до 38 см, уплотненная, призмовидно-глыбистой структуры, средне-суглинистого механического состава, волнистой и резкой границей горизонта, с включением корней растений по всему горизонту, окрас: 10YR 3/2 (очень темновато-серовато-коричневый); B : мощность до 60 см, очень плотная, глыбистой структуры, тяжелого суглинистого механического состава, с ровной и ясной границей, окрас: 10YR 4/4 (темновато-желтовато-коричневый); C : мощность свыше 60 см, очень плотная, призмовидно-плитчатой структуры, тяжело-суглинистого, глинистого механического состава, 10YR 5/4 (желтовато-коричневый). Реакция с соляной кислотой во всех горизонтах отсутствует.

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,31 \cdot A_{Th} + 0,085 \cdot A_K, \quad (1)$$

где A_{Ra} – содержание радия-226, Бк/кг; A_{Th} – содержание тория-232, Бк/кг; A_K – содержание калия-40, Бк/кг.

Радиационно-экологический контроль содержания ТРН (^{137}Cs , ^{90}Sr) проводился согласно нормативному документу «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия».

Графическая иллюстрация полученных результатов, выполнение регрессионного анализа проводилось в программе Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждения

На текущий момент содержание наиболее распространенных ТРН (^{137}Cs и ^{90}Sr) в поверхностном слое почв России для ^{137}Cs в среднем составляет 2,4 кБк/м² и для ^{90}Sr – 1,4 кБк/м². Эти значения соответствуют характерным показателям уровня радиоактивного загрязнения в области между 30° и 60° северного полушария [1]. Для сельскохозяйственных угодий содержание ^{137}Cs в поверхностном слое почв варьируется в интервале от 4,3 до 9,9 Бк/кг, для ^{90}Sr от 1,0 до 5,4 Бк/кг, ^{226}Ra от 15 до 37 Бк/кг, ^{232}Th от 16 до 40 Бк/кг [8].

С учетом отсутствия в границах юга Тюменской области ядерных и особо опасных радиационных объектов уровень радиационного фона во многом определяется природными источниками излучения (за счет содержащихся радионуклидов в атмосфере, воде и почве). Согласно действующему ФЗ №3 от 09.01.1966 «О радиационной безопасности населения», агроэкологический мониторинг состояния почв имеет особое значение в сельскохозяйственной, инженерной и строительной отраслях, поскольку радионуклиды способны надолго аккумулироваться в почве, растениях и длительное время наносить ущерб живым организмам. В табл.3 представлены усредненные результаты исследования содержания естественных и техногенных радионуклидов в поверхностном и пахотном слое почв агроценозов и темно-серых лесных почв Упоровского района юга Тюменской области.

По результатам лабораторного исследования, представленного в табл.4, содержание ЕРН и ТРН не превышает действующих норм радиационной безопасности и согласно ГОСТ 30108-94

относится к I классу. Интервалы содержания ЕРН и ТРН в почвах агроценозов и темно-серых лесных почвах находятся в региональных диапазонах, характерных для территории юга Тюменской области, наличие техногенных радионуклидов объясняется глобальными трансграничными переносами. С учетом ежегодного нарушения естественного состояния верхнего плодородного слоя путем вспахивания и, как следствие, изменения плотности горизонтов, удельная активность ЕРН и ТРН в почвах агроценозов в 1–1,5 раза ниже, чем в фоновых темно-серых лесных почвах. Увеличение содержания ЕРН и ТРН в темно-серых лесных почвах объясняется их медленной миграцией вглубь почвенного профиля и менее активной аккумуляцией растущей на территории древесной и травяной растительностью [2].

Не менее важным с научной и прикладной точки зрения являются радиационно-геохимические исследования ЕРН и ТРН в профиле естественных и антропогенно нарушенных почв. К основным задачам подобного плана работ относится определение зон максимальных и минимальных концентраций радионуклидов, а также выявление факторов, оказывающих влияние на скорость миграции. Результаты исследования содержания естественных (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) и техногенных (^{137}Cs , ^{90}Sr) радионуклидов и их распределение в профиле агроценозов и темно-серых лесных почв Упоровского района юга Тюменской области представлены ниже (табл.4).

Содержание ^{40}K во всех отобранных образцах почвы агроценозов и темно-серых лесных почв находится в диапазоне 183–451 Бк/кг, для ^{232}Th составляет от 6,9 до 33,9 Бк/кг, для ^{226}Ra от < 1 до 43,9 Бк/кг. Содержание ^{40}K в темно-серых лесных почвах Упоровского района колеблется от 145 до 400 Бк/кг, ^{232}Th – от 15,3 до 30 Бк/кг и ^{226}Ra – от 1,1 до 33,6 Бк/кг. Результаты, полученные в ходе анализа почв Упоровского района, свидетельствуют о том, что диапазон значений содержания ^{137}Cs в почвах агроценозов варьируется от 1 до 11,1 Бк/кг, ^{90}Sr от 2 до 9,11 Бк/кг. В то же время фоновые показатели по ^{137}Cs находятся в пределах от 1 до 9,2 Бк/кг, а содержание ^{90}Sr находится ниже предела чувствительности прибора УСК «Гамма плюс». Низкие значения концентраций ТРН на данной территории обусловлены отсутствием постоянных источников их поступления. Обнаружение ТРН связано с их глобальным переносом в результате испытаний «мирных» ядерных взрывов в XX веке. Таким образом, полученные данные относятся к относительно удовлетворительной обстановке, и для данной территории ограничения с радиационно-гигиенической точки зрения отсутствуют. Полученные данные не превышают пределы удельной эффективной активности содержания ЕРН (370 Бк/кг) согласно ГОСТ 30108-94 и относятся к I классу.

Содержание ЕРН в темно-серых лесных почвах Упоровского района можно сопоставить с результатами работы Бурлаенко В.З., где среднее содержание ^{226}Ra – 28,8 Бк/кг и ^{40}K – 439 Бк/кг, что в 2,5 раза выше средних показателей исследуемых почв [2]. По данным [8] среднее содержание ^{226}Ra для серых лесных почв России составляет 18,9 Бк/кг, ^{232}Th – 28,2 Бк/кг, ^{40}K – 400 Бк/кг. Среднее содержание ^{232}Th схоже с полученными данными

Табл.3. Среднее содержание естественных и техногенных радионуклидов в поверхностном и пахотном слое почв агроценозов и темно-серых лесных почв Упоровского района юга Тюменской области.

Тип (подтип) почв	Среднее содержание естественных и техногенных радионуклидов, Бк/кг					
	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	Аэфф	^{137}Cs	^{90}Sr
Почва агроценоза. Темно-серая лесная	328,0	6,7	21,3	59,0	5,7	2,0
Темно-серые лесные. Фоновая	287,0	10,2	24,2	69,78	9,6	3,6

Табл. 4. Содержание естественных и техногенных радионуклидов в профиле агро-темно-серых лесных и темно-серых лесных почв Упоровского района юга Тюменской области.

Глубина отбора проб, см	Почвенный горизонт	Тип (подтип) почв	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	Аэфф	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
			Бк/кг					
0–20	<i>A_{max}/B</i>	1*	183	7,2	20,2	49,22	8,7	4,49
	<i>A₀/A₁</i>	2*	145	9,1	22,3	50,64	9,2	<1
20–40	B	1	244	1,3	6,9	31,08	11,1	9,11
	<i>A₁/B</i>	2	227	2,2	15,3	41,54	5,5	<1
40–60	B	1	451	<1	27,1	73,84	8,9	7,13
	B	2	400	1,1	20,6	62,09	1,3	<1
60–80	B	1	259	<1	33,9	66,42	1,8	2,22
		2	231	1,1	28,6	58,20	1	<1
80–100	B	1	340	43,9	21,9	101,49	<1	2
	B/C	2	314	33,6	30	99,59	2,6	<1
100–120	B/C	1	493	11,6	16,5	75,12	1,8	2,45

Примечание: 1* – Почва агроценоза. Темно-серая лесная; 2* – Темно-серые лесные.

собственного исследования, в то время как показатели ²²⁶Ra и ⁴⁰K превышают показатели в исследуемой почве в 2 и 1,3 раза соответственно [9]. Среднее содержание ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в почвах сельскохозяйственных угодий Сибири по данным Орлова П.М. составляет 12,1 и 5,6 Бк/кг соответственно, что примерно в 3 раза выше по ¹³⁷Cs и сопоставимо с результатами исследования по ⁹⁰Sr в почвах Упоровского района [8]. В работе [20] приведены средние значения содержания ²²⁶Ra – 14,1±1,3 Бк/кг, ⁴⁰K – 318,8±9 Бк/кг, ²³²Th – 15,7±2,3 Бк/кг, ¹³⁷Cs – 18,4±0,6 Бк/кг для бурых лесных почв. Следует отметить, что средние содержания ЕРН на всех исследуемых участках почв Упоровского района находятся в интервале данных, полученных в [20,21].

Ofofola и др. в исследовании экологического риска естественной радиоактивности в почве юго-восточной части Нигерии определили, что среднее содержание по ⁴⁰K составляет 180 Бк/кг, ²²⁶Ra – 56,65 Бк/кг, ²³²Th – 42,92 Бк/кг. Можно заметить, что полученные результаты, за исключением ⁴⁰K, в почвах Упоровского района находятся ниже результатов собственных исследований [9].

Содержание ЕРН и ТРН в верхних горизонтах почв агроценозов (*A_{max}*) и темно-серых лесных почв (*A₀/A₁*) во многом объясняется степенью их антропогенной преобразованности. Так, содержание ЕРН и ТРН (за исключением ⁴⁰K и ⁹⁰Sr) в почвах агроценозов в 1–1,2 раза ниже фоновых значений в темно-серых лесных почвах. Снижение концентрации ЕРН и ТРН в почвах агроценозов по сравнению с темно-серыми лесными почвами в горизонтах *A_{max}* и *A₀/A₁* объясняется высоким промыванием верхних почвенных слоев за счет инфильтрации атмосферных осадков и изменениям плотности почвы за счет постоянной интенсивной распашки. Повышенное относительно «фоновых» значений содержание ⁴⁰K (в 1,2 раза) и ⁹⁰Sr (в 4,5 раза) в почвах агроценозов, возможно, объясняется применением сельскохозяйственных удобрений, которые увеличивают содержание радиоактивного калия, а увеличение ⁹⁰Sr происходит за счет глобального переноса данного радионуклида и его аккумуляции в распаханном гумусовом горизонте. В целом полученное содержание ЕРН и ТРН в почвах агроценозов и темно-серых лесных почвах Упоровского района находится в региональных нормах и коррелируется с данными других авторов [2,3,5,8].

Значительное влияние на содержание ЕРН и ТРН в почвах оказывают зональные факторы, а именно: климатические особенности территории, геолого-геоморфологические условия и почвенно-растительный покров. Во многом процесс аккумуляции и миграции радионуклидов определяется типом ландшафта и произрастающей на ней растительности. Травянистая растительность благодаря корневой системе способствует проникновению радионуклидов вглубь почвы [16]. В целом, выявлена общая черта сходства в вертикальной миграции ЕРН и ТРН в почвах агроценозов и темно-серых лесных почвах, которая заключается в снижении концентрации в горизонте В и увеличении к горизонту С. Миграция ЕРН и ТРН в горизонте В носит скачкообразный характер с резкими пиками снижения и увеличения содержания радионуклидов, что обуславливается сменой механического состава, а также изменениями плотности.

В вертикальной миграции ^{40}K выявлено два пика повышения содержания на глубинах 40–60 см (горизонт В) и 100–120 см (горизонт В). Для ^{226}Ra и ^{232}Th наблюдается незначительная тенденция повышения их содержания в поверхностных слоях (A_{max} , A_0/A_I) и увеличению к материнской породе. Стоит подчеркнуть, что содержание ^{226}Ra , хоть и имеет общую специфику в вертикальной миграции с ^{232}Th и ^{40}K , однако меняется в зависимости от подтипа изучаемых почв. Так, содержание ^{226}Ra с глубин 20–40 см по 60–80 см (горизонт В) в почвах агроценозов находится ниже измерения прибора УСК «Гамма плюс», что говорит о крайне низких концентрациях данного радионуклида. Судя по всему, столь низкое содержание связано с его значительной аккумуляцией сельскохозяйственной растительностью и корневой системой, а также интенсивной распашкой верхних слоев, в связи с чем остатки ^{226}Ra путем инфильтрации под действием атмосферных осадков мигрируют ниже по профилю. В целом пики миграции естественных радионуклидов сосредоточены на трех глубинах: 0–20 см (горизонты A_{max} , A_0/A_I), 40–60 см (горизонт В), 80–100 см (горизонт В/С).

На вертикальную миграцию радионуклидов в почве оказывает влияние множество факторов, среди которых можно выделить: физико-химические свойства самих почв, а также интенсивность проявления элювиальных, гидрогенных и иллювиальных процессов. Немаловажную роль на скорость миграции ЕРН и ТРН в почвах оказывают водопроницаемость и дренированность почв. Изменение этих условий приводит к повышению содержания ЕРН и ТРН в поверхностном слое, в связи с чем миграция радионуклидов в почвах тяжелого механического состава затруднена по сравнению с почвами более легкого механического состава, а наличие трещин, пор и пустот способствуют продвижению радионуклидов вглубь почвенных горизонтов [16]. В исследовании Шапошниковой Л.М. и Шуктовой И.И. указано, что миграционная способность анализируемых радиоизотопов зависит от физико-химических свойств почвы, также отмечено, что удельные активности напрямую зависят от концентраций фосфора, который способен образовывать с рассматриваемыми радионуклидами нерастворимые или слабо растворимые соединения [18].

Содержание и последующая вертикальная миграция ТРН в профилях почв агроценозов и в темно-серых лесных почвах во многом обусловлена их поступлением с атмосферными осадками, типом (подтипом) почв, плотностью, влажностью и геохимическим составом почв. В миграции ТРН в профиле любых почв характерно постепенное снижение их концентрации с глубиной и практически нулевое содержание в материнской породе. Подобное явление обусловлено генезисом изучаемых радионуклидов и их появлению в компонентах природной и антропогенной среды с середины XX века. Аккумуляция ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах агроценозов и темно-серых

лесных почвах происходит в верхних почвенных горизонтах (A_{max} , A_0/A_I и частично приходится на В), наибольшее содержание ТРН выявлено в почвах агроценозов за счет их интенсивной распашки, открытости при выпадении атмосферных осадков, а также предположительно внесению сельскохозяйственных удобрений, которые увеличивают плодородие почвы и, как следствие, способствуют фиксации ТРН в почвенном профиле. Содержание ^{90}Sr в темно-серых лесных почвах находится ниже предела измерения «УСК Гамма Плюс». Аналогичные особенности в миграции ТРН в почвах отмечены в работах других авторов [14], занимающихся геохимией техногенных радионуклидов в границах зон чрезвычайных обстановок, где их содержание в почвах можно классифицировать как «чрезвычайно опасное». Так, в [10] отмечено, что основная концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr в бурых лесных, дерново-подзолистых, черноземно-луговых, дерново-луговых почвах зоны ВУРС (Восточно-Уральского радиоактивного следа) сосредоточено в гумусированном слое (5–20 см) и снижается с глубиной, повторные «следы» радиоактивного загрязнения фиксируются на глубинах 40–45 см (горизонт В), что аналогично собственным результатам исследования (табл.3). По данным авторов основное количество ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных экосистемах аккумулируется в верхнем органогенном горизонте, а их вертикальное перемещение в почвенном профиле характеризуется равномерным распределением [10]. Как отмечено в [14], распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах зависит от содержания гумуса, наличия гуминовых и фульвокислот, а также физико-химических свойств слагающей почву породы. В случае ^{137}Cs и ^{90}Sr авторами обнаружено, что на их миграцию и фиксацию в почвенном профиле существенное влияние оказывает не физическая глина, а фиксация органическим веществом и связывание микробиотой, мицелием почвы [14]. Вертикальная миграция радионуклидов в почвах Плавского района Тульской области в [19] характеризуется пониженной активностью по причине наличия в почвах высоких концентраций мелкодисперсных частиц. Таким образом, прочность закрепления радионуклидов посредством почвогрунтовых свойств влияет на очищение территории от радиоактивных изотопов, из-за барьерных частиц происходит накопление и концентрация радиоизотопов в поверхностном слое. Главным загрязняющим радионуклидом является ^{137}Cs , концентрация которого в большей степени фиксируется в поверхностном слое от 0 до 15 см, при этом с понижением значений по глубине. Суммарная активность данного техногенного радионуклида составляет 2230,9 Бк/кг, что соответствует плотности поверхностного радиоактивного загрязнения 18,1 Ки/км² [19]. В [12] на тему изучения интенсивности самоочищения почв в районе аварии на Чернобыльской АЭС отмечено, что вертикальное распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в большей степени сконцентрировано в корнеобитаемом слое (0–15 см). Интенсивность миграции анализируемых ТРН зависит от уровня увлажненности грунта, типа почв и физико-химических свойств радионуклидов. Так, в 30-км зоне ЧАЭС среднее смещение радиостронция составляет от 4,6 до 5,9 см, радиоцезия от 4,1 до 4,9, соответственно. Авторами был сделан вывод, что вертикальная миграция является незначительным фактором удаления ^{137}Cs и ^{90}Sr из корнеобитаемого слоя в сравнении с ролью радиоактивного распада [12].

Полученные результаты собственных исследований, как уже было сказано ранее, коррелируют с работами других авторов и подчеркивают общую специфику вертикальной миграции ЕРН и ТРН в изучаемых типах почв.

Геохимические и радиационно-экологические условия территории являются основными параметрами нормального функционирования экосистем. Изучение процессов вертикальной миграции химических элементов и радионуклидов в зональных и интразональных почвах раз-

ной степени преобразованности является важным с научной и прикладной точки зрения видом работ, требующим более углубленных исследований. Для оценки влияния естественных радионуклидов на санитарно-эпидемиологическую ситуацию территории исследования была проведена радиационно-геохимическая оценка агро-темно-серых лесных почв в границах пункта наблюдения ФГБУ ГСАС «Тюменский». Результаты геохимического исследования почв агроценозов представлены в табл.5, а выявление характера взаимодействия между естественными радионуклидами, макро- и микроэлементами в табл.6.

Превышений предельно допустимых, а также ориентировочно допустимых концентраций химических элементов согласно действующему СанПиН 1.2.3685-21 выявлено не было. С геохимической точки зрения изучаемый тип почв согласно МУ 2.1.7.730-99 можно отнести к категории «чистых».

Целью регрессионного анализа было выявление взаимосвязей между естественными радионуклидами и макро-, микроэлементами, а также определение характера их взаимодействия. Как известно, на миграцию и аккумуляцию радионуклидов может оказывать влияние химический состав среды. В качестве объектов исследования выбраны почвы агроценозов площадок мониторинга ФГБУ ГСАС «Тюменский», результаты исследования представлены в табл.6.

На миграцию и содержание радионуклидов оказывает влияние множество факторов, среди которых лимитирующими будут зональные (климатические, геолого-геоморфологические, гидрологические, ботанические, почвенные) условия территории. По результатам корреляционного анализа удельной активности ЕРН и ТРН в почвах и выявлением взаимосвязи их содержания с макро- и микроэлементами были сделаны следующие выводы:

- Выявлено, что наибольшее влияние на содержание ^{40}K оказывают: К подвижный ($r = 0,50$), Ni ($r = 0,97$), Zn ($r = 0,85$), Cd ($r = 0,70$), Cu ($r = 0,69$), гумус (0,67), Fe ($r = 0,55$), Co ($r = 0,50$), Mg ($r = 0,50$), где r – коэффициент корреляции. С уровнем кислотности pH, S, Pb взаимосвязи не обнаружено.
- Наибольшее влияние на содержание ^{226}Ra среди рассматриваемых химических элементов оказывает pH ($r = 0,50$), Mg ($r = 0,60$), S ($r = 0,60$). Взаимосвязи с Cd, Ni, K, Fe, Co, Cu, Pb и с гумусом выявлено не было.

Табл.5. Содержание химических элементов в почвенном профиле почв агроценозов Упоровского района по данным ФГБУ ГСАС «Тюменский».

Глубина отбора проб, см	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100	ПДК/ОДК
Гумус	6,13	3	2,04	1,84	1,56	-/-
pH	5,6	5,5	5,5	4,3	4,4	-/-
Калий подвижная форма, мг/кг	130	464	33,1	135	108	-/-
Медь, мг/кг	11,2	9,6	13,6	11,7	10,8	-/66
Цинк, мг/кг	31,9	31,3	20,4	34,6	30,6	-/110
Кобальт, мг/кг	12,2	9,6	9,3	8	7,9	50/-
Магний, мг/кг	510	555	230	219	558	1500/-
Железо, мг/кг	9500	9500	10250	10500	10000	-/40000
Сера, мг/кг	6,2	7	6,4	7,1	6,2	160/-
Свинец, мг/кг	12,7	10,4	10,3	8,2	10	32/65
Никель, мг/кг	21,6	21,6	29	23,5	24,7	-/40
Кадмий, мг/кг	0,112	0,085	0,01	0,01	0,06	-/1

Табл.6. Характер взаимодействия естественных и техногенных радионуклидов с макро- и микроэлементами в почвах агроценозов.

Показатель	Уравнение регрессии	Показатель	Уравнение регрессии
Гумус	$y(^{40}\text{K}) = -0,01x + 6,52, r = 0,67$	рН	$y(^{40}\text{K}) = -0,00x + 5,17, r = 0,06$
	$y(^{226}\text{Ra}) = -0,02x + 3,17, r = 0,25$		$y(^{226}\text{Ra}) = -0,01x + 5,23, r = 0,50$
	$y(^{232}\text{Th}) = -0,06x + 4,24, r = 0,32$		$y(^{232}\text{Th}) = -0,03x + 5,85, r = 0,55$
	$y(^{137}\text{Cs}) = 0,20x + 1,68, r = 0,52$		$y(^{137}\text{Cs}) = 0,12x + 4,28, r = 0,96$
	$y(^{90}\text{Sr}) = 0,10x + 2,40, r = 0,17$		$y(^{90}\text{Sr}) = 0,17x + 4,20, r = 0,81$
К п.ф., мг/кг	$y(^{40}\text{K}) = -0,78x + 404,59, r = 0,50$	Cu, мг/кг	$y(^{40}\text{K}) = 0,01x + 8,48, r = 0,69$
	$y(^{226}\text{Ra}) = -1,98x + 194,8, r = 0,22$		$y(^{226}\text{Ra}) = -0,02x + 11,59, r = 0,26$
	$y(^{232}\text{Th}) = -13,72x + 476, r = 0,82$		$y(^{232}\text{Th}) = 0,10x + 9,04, r = 0,73$
	$y(^{137}\text{Cs}) = 15,85x + 77,27, r = 0,50$		$y(^{137}\text{Cs}) = -0,01x + 11,44, r = 0,03$
	$y(^{90}\text{Sr}) = 31,77x + 15,47, r = 0,59$		$y(^{90}\text{Sr}) = -0,04x + 11,59, r = 0,09$
Zn, мг/кг	$y(^{40}\text{K}) = -0,04x + 42,97, r = 0,85$	Co, мг/кг	$y(^{40}\text{K}) = -0,01x + 11,86, r = 0,50$
	$y(^{226}\text{Ra}) = 0,03x + 29,36, r = 0,13$		$y(^{226}\text{Ra}) = -0,03x + 9,73, r = 0,35$
	$y(^{232}\text{Th}) = -0,04x + 30,71, r = 0,08$		$y(^{232}\text{Th}) = -0,06x + 10,78, r = 0,36$
	$y(^{137}\text{Cs}) = -0,40x + 32,24, r = 0,37$		$y(^{137}\text{Cs}) = 0,24x + 7,91, r = 0,68$
	$y(^{90}\text{Sr}) = -0,79x + 33,74, r = 0,45$		$y(^{90}\text{Sr}) = 0,19x + 8,41, r = 0,35$
Mg, мг/кг	$y(^{40}\text{K}) = -0,77x + 643,18, r = 0,50$	Fe, мг/кг	$y(^{40}\text{K}) = 2,39x + 924,9, r = 0,55$
	$y(^{226}\text{Ra}) = 5,01x + 361,87, r = 0,60$		$y(^{226}\text{Ra}) = -1,13x + 996,9, r = 0,05$
	$y(^{232}\text{Th}) = -13,97x + 721,9, r = 0,80$		$y(^{232}\text{Th}) = 39,29x + 908,5, r = 0,88$
	$y(^{137}\text{Cs}) = 4,19x + 388,83, r = 0,12$		$y(^{137}\text{Cs}) = -55,08x + 102, r = 0,60$
	$y(^{90}\text{Sr}) = 6,47x + 382,09, r = 0,11$		$y(^{90}\text{Sr}) = -69,24x + 102, r = 0,47$
S, мг/кг	$y(^{40}\text{K}) = -0,01x + 6,87, r = 0,24$	Pb, мг/кг	$y(^{40}\text{K}) = -0,04x + 11,78, r = 0,32$
	$y(^{226}\text{Ra}) = -0,02x + 6,71, r = 0,60$		$y(^{226}\text{Ra}) = 0,01x + 10,29, r = 0,03$
	$y(^{232}\text{Th}) = -0,01x + 6,59, r = 0,02$		$y(^{232}\text{Th}) = -0,07x + 12,01, r = 0,50$
	$y(^{137}\text{Cs}) = 0,02x + 6,53, r = 0,08$		$y(^{137}\text{Cs}) = 0,18x + 9,19, r = 0,56$
	$y(^{90}\text{Sr}) = 0,03x + 6,42, r = 0,23$		$y(^{90}\text{Sr}) = 0,15x + 9,55, r = 0,30$
Ni, мг/кг	$y(^{40}\text{K}) = 0,03x + 15,65, r = 0,97$	Cd, мг/кг	$y(^{40}\text{K}) = -0,03x + 0,14, r = 0,70$
	$y(^{226}\text{Ra}) = 0,03x + 24,03, r = 0,03$		$y(^{226}\text{Ra}) = 0,004x + 0,05, r = 0,19$
	$y(^{232}\text{Th}) = 0,15x + 20,76, r = 0,50$		$y(^{232}\text{Th}) = -0,02x + 0,12, r = 0,73$
	$y(^{137}\text{Cs}) = -0,06x + 24,48, r = 0,11$		$y(^{137}\text{Cs}) = 0,02x + 0,03, r = 0,38$
	$y(^{90}\text{Sr}) = 0,03x + 23,91, r = 0,03$		$y(^{90}\text{Sr}) = 0,002x + 0,04, r = 0,19$

Примечание: y – содержание i -го радионуклида, Бк/кг; x – содержание рассматриваемого параметра, r – коэффициент корреляции.

- Для ^{232}Th влияние на содержание в почве оказывает: рН ($r = 0,55$), К ($r = 0,82$), Cu ($r = 0,73$), Mg ($r = 0,80$), Fe ($r = 0,88$), Pb ($r = 0,50$), Ni ($r = 0,50$), Cd ($r = 0,73$). Взаимосвязь с гумусом, Zn, Co, S не установлена.
- На содержание техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr оказывают достаточное влияние рН ($r = 0,96$ (^{137}Cs) и $r = 0,81$ (^{90}Sr)) и К ($r = 0,50$ (^{137}Cs) и $r = 0,59$ (^{90}Sr)). Для ^{137}Cs также установлена взаимосвязь с Co ($r = 0,68$), Fe ($r = 0,60$), Pb ($r = 0,56$) и гумусом ($r = 0,52$). Взаимосвязь с Cu, Zn, Mg, S, Ni и Cd у рассматриваемых техногенных радионуклидов не обнаружена.

Аналогичные результаты исследования, связанные с изучением характера взаимодействия ТРН с макро- и микроэлементами, отмечены в работах отечественных ученых [5,8].

Таким образом, можно сделать вывод, что на содержание естественных радионуклидов в действительности оказывает значимое влияние химический состав почвы. В данном исследовании это микроэлементы: никель, магний и калий подвижный, наличие которых в темно-серых лесных почвах обуславливается агрохимическими особенностями района исследования.

Заключение

Проведенное радиационно-геохимическое исследование почв агроценозов и темно-серых лесных почв Упоровского района Тюменской области позволяет сделать следующие выводы:

- результаты радиационно-экологического исследования поверхностного/пахотного слоя почв Упоровского района соответствует региональным нормам, превышений удельной активности естественных и техногенных радионуклидов выявлено не было [11];
- зоны аккумуляции и миграции естественных и техногенных радионуклидов соответствуют зонам изменения основных почвенных характеристик и степени антропогенной преобразованности почвенных горизонтов;
- характер взаимосвязи между естественными и техногенными радионуклидами с макро- и микроэлементами характеризуется в большинстве случаев отрицательной корреляцией. Высокие положительные коэффициенты корреляции были отмечены во взаимосвязи ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th с никелем, марганцем, калием подвижным.

Полученные в ходе исследования данные могут использоваться в процессе проведения инженерно-экологических изысканий, при проведении экологического мониторинга, составления общих региональных норм содержания естественных и техногенных радионуклидов Упоровского района, а также в научных целях.

Литература

1. Бекман И.Н. Радиоэкология и экологическая радиохимия: учебник для среднего профессионального образования. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2024. 497 с.
2. Бурлаенко В.З., Игашева С.П. Анализ активности природных радионуклидов в почвенно-растительном покрове на территории юга Тюменской области // Самарский научный вестник. Т. 9, № 3, 2020. С. 32-36. DOI: 10.17816/snvt202093105.
3. Герменчук М.Г. Радиационный мониторинг окружающей среды: учебное пособие. Минск: Высшая школа, 2021. 58 с., л. цв. вкл. ил. ISBN 978-985-06-3324-8.
4. Захарова Е.В. Эколого-радиационное состояние природной среды Тюменской области. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук, 2006.
5. Кайгородов Р.В. Удельная активность радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах прибрежных зон водных объектов Тюменской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 9. С. 66-70. DOI: 10.17513/use. 37472.
6. Кузин А.М. Проблемы современной радиобиологии. М.: «Знание». 1987. 64 с.
7. Кузнецов В.К., Князева Е.П., Санжаров А.И., Кречетникова Е.О., Цветнова О.Б. Динамика распределения ^{137}Cs в почвах Тульской области до и после аварии на Чернобыльской АЭС // Вестн. Моск. ун-та., сер. 17. Почвоведение. 2022. № 4. С. 31-37.
8. Орлов П.М., Аканова Н.И. Радиоактивность почв сельскохозяйственных угодий Сибири в условиях различной интенсивности химизации сельскохозяйственного производства // Агрохимия. 2019. № 9. С. 91-96. DOI: 10.1134/S0002188119090102.

9. Орлов П.М., Сычев В.Г., Аканова Н.И. Естественные радионуклиды в почвах России и фосфатных рудах планеты // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2020. Т. 63. № 4(376). С. 62-67. DOI: 10.24411/2587-6740-2020-14074.
10. Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н., Антонова Е.В. Современное состояние наземных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа: уровни загрязнения, биологические эффекты. Екатеринбург: изд-во «Гощицкий», 2008. 204 с.
11. Правительство Тюменской области. Доклад об экологической ситуации в Тюменской области в 2022 году. 2023. 12 с.
12. Рудая С.М., Чистик О.В., Жукова О.М. Вертикальная миграция радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах 30-км зоны // *АНРИ*. № 2(33). 2003. С. 30-36.
13. Скипин Л.Н., Захарова Е.В., Бурлаенко В.З. Экологическое состояние почв в эпицентре подземного ядерного взрыва «Тавда» // *Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование*. 2016. Том 2. № 1. С. 20-29. DOI: 10.21684/2411-7927-2016-2-1-20-29.
14. Собонович Э.В., Бондаренко Г.Н., Кононенко Л.В., Долин В.В., Садолько И.В., Сущик Ю.Я., Демченко Л.В., Шраменко И.Ф., Шевченко А.Л., Пушкарев А.В., Злобенко Б.П., Орлов А.А. // *Геохимия техногенных радионуклидов*. Киев: изд-во «Наукова Думка», 2002. 328 с.
15. Старков В.Д., Мигунов В.И. Радиационная экология. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. 74 с.
16. Тюрюканова Э.Б. Радиогеохимия почв полесий Русской равнины. М.: Наука, 1974. 142 с.
17. Хекало Н.Л., Пучков Ю.Н. Динамика содержания радионуклидов в черноземах Тульской области // *Материалы научно-практической конференции «Чернобыль: экология, человек, здоровье»*. М., 2006.
18. Шапошникова Л.М., Шуктомова И.И. Особенности распределения урана, тория и радия в профиле техноподзолистой почвы // *Успехи современного естествознания*. 2016. № 6. С. 48-52.
19. Щукин М.В., Содбоев Ц.Ц., Калемениев С.А., Бирюкова Н.В. Вертикальная миграция радионуклидов в почвах Плавского района Тульской области // *Физико-химическая биология: радиобиология*. 2017. С. 132-136.
20. D. Tserendorj, K.Z. Szabo, P. Volgyesi, T.C. Nguyen et al, «Nelson Salazar-Yanez, Csaba Szaby – Distribution and impacts of contamination by natural and artificial radionuclides in attic dust and urban soil samples from a former industrial Hungarian city: A case study from Salgotarjan», *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 270, December 2023. 107291 DOI: 10.1016/j.jenvrad.2023.107291
21. O.M. Ofomola, F.O. Ugbede, O. Anomohanran, «Environmental risk assessment of background radiation, natural radioactivity and toxic elements in rocks and soils of Nkalagu quarry, Southeastern Nigeria», *Journal of Hazardous Materials Advances*, no. 10 (2023). Article 100288 DOI: 10.1016/j.hazadv.2023.100288.

Geochemical Factors Influencing the Content and Migration of Natural and Anthropogenic Radionuclides in Soils Uporovsky District of the Tyumen Region

Guriev Nikita¹, Sindireva Anna¹, Kotchenko Sergei², Andreenko Polina³, Lyapina Polina¹

¹ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Tyumen State University», Tyumen, Russian Federation

² Federal State Budgetary Institution State Station of Agrochemical Service «Tyumenskaya», Tyumen, Russia

³ Limited Liability Company «Service Oil Company», Tyumen, Russia

Abstract. From the sanitary and hygienic point of view it is necessary to study not only the chemical composition of soils (macro- and microelements), but also the content of natural and anthropogenic radionuclides regardless of the anthropogenic load on the territory. Active development of nuclear industry since the middle of XX century, nuclear tests all over the world and as a consequence of global increase of radiation background still requires deep radiation-geochemical studies of various landscapes. Radiation-geochemical studies of not only anthropogenic, but also natural radionuclides have an important scientific and applied significance. Specific effective activity of natural (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) and anthropogenic (^{137}Cs , ^{90}Sr) radionuclides in the profile of dark gray forest soils of the Uporovsky district of the Tyumen region. In the work the zones of accumulation and dispersion of natural and anthropogenic radionuclides in the profile of the studied soils of agrocenoses and conditionally background soils of dark gray forest soils are identified and analyzed, and the character of their interaction with macro- and microelements is outlined.

Keywords: natural radionuclides, technogenic radionuclides, macroelements, trace elements, soils, south of the Tyumen region.

Н.Е.Гурьев¹ (ст. препод.), А.В.Синдирева¹ (д.б.н., доцент, зав.каф.),

С.Г.Котченко² (директор), П.А.Андреев³ (техник), П.Е.Ляпина¹ (студ.)

¹ ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень

² ФГБУ ГЦАС «Тюменский», г. Тюмень

³ ООО «Сервисная нефтяная компания», г. Тюмень

Контакты: sindireva72@mail.ru, nikitka.gurev.1996@mail.ru



РОСАТОМ



Российская Академия Наук



ИБРАЭ



Международная научная конференция Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях

29-31 октября 2025



Москва, Президиум Российской Академии Наук

Пленарная сессия: 80-летие атомной отрасли России, оценка прогресса в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности за последние 10-15 лет.

СЕКЦИИ



Радиационная
безопасность человека
и живой природы



Расчетные программы для
прогнозирования и
обоснования радиационной
защиты и радиационной
безопасности



Безопасность на
завершающих стадиях
жизненного цикла: вывод
из эксплуатации и
обращение с ОЯТ и РАО

Председатель организационного комитета – директор по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом» **Тинин Василий Владимирович**

Сопредседатель Президиума Программного комитета Конференции – академик РАН, научный руководитель ИБРАЭ РАН **Большов Леонид Александрович**



Для участия в Конференции необходимо **до 15 мая 2025 года** подать заявку путем регистрации в личном кабинете на сайте. Участие не предполагает организационного взноса.

<https://фцп-яrb.рф/conf2025/>

По итогам Конференции планируется издание сборника трудов

Приглашаем принять участие в Конференции профильных специалистов!



РЗА-08Д / РЗБА-08Д

УСТАНОВКА КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ
ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПЕРСОНАЛА

Установка контроля радиоактивной загрязнённости рук, ног (обуви) и одежды персонала бета-, альфа- и гамма-активными нуклидами.

Удобный интуитивно понятный интерфейс, высокочувствительные сцинтилляционные блоки детектирования большой площади.

Различные варианты исполнений:

- контроль рук и ног (основное исполнение)
- контроль рук (консольное исполнение)
- выносной блок для контроля одежды



www.doza.ru



+7 (495) 777 84 85



info@doza.ru



ППСР 2025

13-17 октября
📍 Санкт-Петербург

Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии

*XVII Международное совещание
им. Владимира Николаевича
Даниленко*



 **RITVERC**
Isotopenprodukte

 **АСРМ**

 **ПОЛИТЕХ**
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

ppsr.pro
Регистрация:
ppsr25@ritverc.com