

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Золотов Сергей Александрович

**Методы восстановления энергетического спектра ускоренных электронов
для дозиметрического планирования радиационной обработки
объектов произвольной формы и химического состава**

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Диссертация подготовлена на Кафедре физики ускорителей и радиационной медицины Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и в Отделе ядерно-физических методов в медицине и промышленности Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель

– Черняев Александр Петрович,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты

– Полозов Сергей Маркович,
доктор физико-математических наук, доцент;
Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ», заведующий кафедрой электрофизических
установок (№14) института ядерной физики
и технологии

Чуличков Алексей Иванович,
Доктор физико-математических наук, профессор; МГУ
имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
заведующий кафедрой математического моделирования
и информатики

Лютова Жанна Борисовна,
кандидат химических наук, доцент; Санкт-
Петербургский государственный технологический
институт (технический университет), инженерно-
технологический факультет, кафедра радиационной
технологии, доцент

Защита диссертации состоится «13» февраля 2026 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 11999 Москва, Ленинские горы, д. 1, строение 5 (19-й корпус НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале:
<https://dissovet.msu.ru/dissertation/3710>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Электронная почта совета для справок: galan_lidiya@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,



Л.И. Галанина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень ее разработанности

Радиационные технологии на базе ускорителей электронов используются в 70 странах мира для решения широкого перечня задач: радиационной модификации полимеров [1]; стерилизации медицинских изделий [2], костных имплантов [3] и косметики [4]; модификации эфиров и феромонов [5]; повышения урожайности сельскохозяйственных культур [6], обработки посевного материала [7], продления сроков хранения мяса [8], рыбы [9] и птицы [10], а также в ряде других областей [11].

Для гарантированного достижения требуемого эффекта радиационной обработки необходимо обеспечить максимально равномерное распределение поглощённой дозы в области интереса при минимальной дозовой нагрузке на остальной объем. Доставка к объекту дозы, выше требуемой, ведёт к необратимому повреждению продукта. Доставка меньшей – ведёт к недостижению эффекта.

Поэтому при планировании радиационной обработки необходимо точно знать распределение поглощенной дозы по объему объекта. В большинстве случаев прямое измерение дозового распределения в обрабатываемом объекте невозможно, поэтому прибегают к компьютерному моделированию методом Монте-Карло. Точность полученных таким образом данных напрямую зависит от точности воспроизведения эксперимента в моделировании: геометрии и энергетического спектра излучения. Если геометрические параметры обычно известны с высокой точностью, то спектр, как правило, конечному пользователю ускорителя не известен. Измерение спектра – нетривиальная процедура, требующая узкоспециализированного дорогостоящего оборудования и квалифицированных специалистов, в то время как для введения ускорителя в эксплуатацию по международным и национальным стандартам достаточно знать «эффективную энергию» электронов, определяющуюся по их экстраполированному пробегу. Однако последние исследования [12] показывают, что дозовые распределения, рассчитанные по энергии экстраполированного пробега, отличаются от распределений, рассчитанных по точному спектру, до 15%.

Альтернативой прямому измерению спектра является решение обратной задачи восстановления энергетического распределения электронного пучка по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям. Такие методы уже существуют, однако большинство из них фактически представляет собой различные вариации регуляризации Тихонова, отличающиеся выбором регуляризирующего функционала, параметризации спектра или оптимизационных эвристик. При всём их разнообразии эти подходы остаются преимущественно математическими конструкциями и не учитывают физические процессы, определяющие изменение пучка при его распространении в воздухе: рассеяние, уширение спектра и формирование низкоэнергетической составляющей.

В связи с этим актуальной научной и прикладной задачей является создание метода восстановления спектра ускоренных электронов по данным, доступным для измерения в производственных условиях – а именно центрально-осевым глубинным дозовым распределениям, – который учитывал бы изменение энергетического спектра ускоренных электронов по мере их распространения в воздухе и обеспечивал получение физически корректных и воспроизводимых спектров.

Цель исследования заключалась в разработке метода восстановления энергетического спектра ускоренных электронов по глубинным дозовым распределениям, учитывающий ослабление спектра электронов по мере их распространения в воздухе, и его интеграции в методику дозиметрического планирования радиационной обработки объектов произвольной формы и химического состава. Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Построить модель изменения энергетического спектра ускоренных электронов с энергией до 25 МэВ по мере их распространения в воздухе.

2. Разработать метод восстановления энергетического спектра источника электронов с энергией до 25 МэВ по спектру испущенных электронов, прошедших в воздухе путь до 140 см.
3. Разработать метод восстановления энергетического спектра ускоренных электронов с энергией до 25 МэВ по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям, учитывающий ослабление спектра электронов по мере их распространения в воздухе.
4. Провести экспериментальную проверку разработанных методов на промышленных и медицинских линейных ускорителях электронов.
5. Интегрировать разработанный метод восстановления энергетического спектра ускоренных электронов в методику дозиметрического планирования радиационной обработки объектов произвольной формы и химического состава.
6. Провести апробацию разработанной методики в условиях центра промышленной радиационной обработки.

Объект и предмет исследования

Объектом исследований являлись пучки электронов, генерируемые линейными импульсными ускорителями электронов. Предметом исследований являлась взаимосвязь энергетического спектра пучка ускоренных электронов с распределением поглощенной дозы по объему облучаемых объектов.

Методология исследования

В основу исследования положен комплексный подход, сочетающий компьютерное моделирование, экспериментальные измерения и математическую обработку данных:

1. Компьютерное моделирование выполнялось методом Монте-Карло, реализованным в инструментарии Geant4, и включало в себя:
 - а. расчет распределений поглощенной дозы по объему фантомов, аналогичных экспериментальным, при различных параметрах источника электронов;
 - б. расчет энергетических спектров ускоренных электронов с начальной энергией до 25 МэВ, проходящих в воздухе путь до 140 см.
2. Экспериментальная часть включала измерение дозовых распределений на медицинском (Varian TrueBeam) и промышленных (УЭЛР-10-15-С, Mevex MB 10-30 SC900) ускорителях электронов. Измерения проводились в соответствии с международными (IAEA TRS-398) и национальными (ГОСТ 34157-2017) протоколами в фантомах из воды, «твердой воды»¹, алюминия и PETG-пластика.
3. Математико-алгоритмическая часть включала сглаживание результатов моделирования путем их аппроксимации гладкими функциями, а также решение обратных задач методами SVD-разложения с фильтрацией малых сингулярных чисел и регуляризации А.Н. Тихонова. Базовые численные методы были взяты из библиотек NumPy и SciPy, язык программирования Python3.

Положения, выносимые на защиту

1. Энергетический спектр ускоренных электронов с энергией до 25 МэВ, прошедших в воздухе путь до 140 см, описывается в виде интегральной свертки исходного спектра электронов с ядром, выражающемся через распределение Ландау.
2. Уравнение Фредгольма 1-го рода, описывающее ослабление энергетического спектра электронов по мере их распространения в воздухе, допускает устойчивое обращение методом SVD-разложения с фильтрацией сингулярных чисел. При отсутствии шума во входных данных исходный спектр восстанавливается однозначно.
3. Представление энергетического спектра ускоренных электронов в виде суммы основной компоненты, выражающейся через интегральную свертку распределений Ландау и Гаусса,

¹«Твердая вода»: 97.9% полистирол (C₈H₈)_n, 2.1% диоксид титана TiO₂; плотность 1.045 г/см³.

и поправочной компоненты, рассчитываемой методом А.Н. Тихонова, позволяет восстановить его по глубинным дозовым распределениям с шагом 0.1 МэВ и погрешностью не более 5%.

4. Использование восстановленных энергетических спектров ускоренных электронов для расчета распределений поглощенной дозы по объему объектов произвольной формы и химического состава методом Монте-Карло позволяет предсказывать дозовые поля с погрешностью не более 5% и выявлять локальные неоднородности в дозовых распределениях на этапе планирования радиационной обработки.

Научная новизна работы

1. Предложена модель, описывающая изменение энергетического спектра ускоренных электронов с энергией до 25 МэВ по мере их распространения в воздухе.
2. Впервые получено устойчивое решение обратной задачи восстановления энергетического спектра источника электронов по спектру испущенных электронов, прошедших в воздухе известный путь.
3. Показано, что восстановление энергетического спектра ускоренных электронов по глубинным дозовым распределениям в виде суммы основной – представляемой в виде интегральной свертки распределения Гаусса с ядром, выражающимся через распределение Ландау – и поправочной, рассчитываемой методом А.Н. Тихонова, компонент, позволяет получить энергетический спектр с ошибкой не более 5%.
4. Сформирована методология дозиметрического планирования радиационной обработки объектов произвольной формы и химического состава на радиационно-технических установках на базе ускорителей электронов, учитывающая ослабление энергетического спектра электронов по мере их распространения в воздухе.

Практическая и теоретическая значимость работы

1. Предложенная методика восстановления энергетического спектра ускоренных электронов по глубинным дозовым распределениям формирует расширяет теоретические основы для решения обратных задач дозиметрии электронных пучков и повышает точность расчётов дозовых полей.
2. Разработанный алгоритм восстановления энергетического спектра ускоренных электронов по глубинным дозовым распределениям лёг в основу систем «DosePreview by IRT» и «Туя» для быстрого расчёта распределений поглощенной дозы по объему объектов наиболее распространенных в радиационной обработке форм.
3. Результаты экспериментальных измерений поверхностной дозы на ускорителях УЭЛР-10-15С и Mevex MB 10-30 SC900 легли в основу системы «Demetra by IRT» для расчета оптимальных параметров работы радиационно-технических установок на базе ускорителей электронов, обеспечивающих доставку заданной дозы до обрабатываемого объекта.
4. Полученные результаты используются в учебном процессе на физическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова в курсах «Дозиметрия ионизирующих излучений» и «Компьютерное моделирование ядерно-физического эксперимента с использованием инструментария Geant4», «Ядерно-физические методы в медицине», а также в образовательных программах повышения квалификации специалистов в области радиационной обработки.
5. Разработанная методика дозиметрического планирования была внедрена в промышленную практику в центре радиационной обработки «Ахентер» (г. Дубна).

Личный вклад автора

Все основные результаты диссертационной работы получены автором лично или при его непосредственном участии. Все компьютерные моделирования, представленные в работе, выполнены лично автором с использованием инструментария Geant4. Автором построен аналитический оператор эволюции энергетического спектра электронного пучка при его распространении в воздухе и получено устойчивое решение задачи его обращения.

Автор принимал участие в планировании и проведении экспериментов на ускорителях электронов Varian TrueBeam (НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко) и Mevex MB 10-30 SC900 (ООО «Axenter», г. Дубна), верификации разработанных алгоритмов, анализе и интерпретации результатов, а также в подготовке публикаций и докладов по теме диссертации.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность научных результатов и выводов обеспечена использованием апробированных методик экспериментальных и теоретических исследований. Экспериментальные измерения проводились с применением сертифицированного оборудования. Обработка экспериментальных данных осуществлялась стандартными методами математической статистики. Результаты моделирования, полученные с использованием инструментария Geant4, находятся в хорошем согласии с проведенными экспериментальными исследованиями, а также с имеющимися данными модельных расчётов и экспериментальных измерений других авторов. Численные методы, использованные в исследовании, реализованы на основе классических python-библиотек NumPy и SciPy, прошедших многолетнюю апробацию и признанных научным сообществом эталонными инструментами вычислительного анализа.

Апробация результатов

Основные результаты и положения диссертации докладывались автором и обсуждались в **26 докладах международных и всероссийских конференциях**, научных школах и семинарах, среди которых:

- Международная конференция «Ядро» – 2021 – 2025;
- Всероссийская школа НЦФМ по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорительной технике – 2025;
- Международный симпозиум МАГАТЭ «International Symposium on Food Safety and Control» – 2024;
- Международная конференция FQFS – 2024, 2025;
- Международная конференция RAP – 2022 – 2024;
- Международная конференция RAD – 2022;
- Международная научно-практическая конференция «Полярное сияние» – 2025;
- Международная молодёжная конференция «Генетические и радиационные технологии в сельском хозяйстве» – 2022 – 2025;
- Межвузовская научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» – 2021 – 2022.
- Научная конференция «Ломоносовские чтения» – 2020, 2023 – 2025;
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» – 2022, 2023;

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника по области исследований: расчетно-теоретические и экспериментальные исследования параметров пучков; расчетно-теоретические и экспериментальные исследования взаимодействий пучков заряженных частиц с мишенями.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Поддержка исследования

Исследования поддержаны Российским научным фондом («Поиск биохимических маркеров идентификации радиационной обработки объектов органического происхождения» № 22-63-00075, 2022-2025 гг.) и Фондом содействия инновациям («Разработка и тестирование прототипа системы планирования радиационной обработки продуктов питания и изделий медицинского назначения», договор № 319ГС1ЦТС10-D5/80272 от 24.11.2022).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 143 страницы текста, включая 34 рисунка и 7 таблиц. Список литературы включает 123 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность исследований по теме диссертации, формулируется цель работы, приводятся основные результаты, обосновывается научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов работы, описывается личный вклад автора работы, приводится список публикаций и докладов на конференциях, на которых были представлены результаты выполненных исследований, приводится структура и краткое содержание диссертации.

В **первой главе** приведён обзор современных радиационных технологий, основанных на использовании ускоренных электронов. Рассмотрены основные области их применения – лучевая диагностика и медицина, высокотехнологическая, пищевая, сельскохозяйственная и полимерная промышленности, – а также типичные диапазоны доз, соответствующие различным технологическим целям. Приведены сведения о действующих международных и национальных стандартах дозиметрического контроля, регламентирующих процедуры планирования радиационной обработки. Показаны ограничения существующих подходов, не учитывающих геометрию облучаемого объекта, энергетический спектр ускоренных электронов и его изменение по мере распространения электронов в воздухе.

Рассмотрены существующие методы прямого измерения энергетического спектра пучков электронов и их ограничения для рутинного применения в промышленности. Описаны методы восстановления спектра, основанные на решении обратных задач по экспериментальным дозиметрическим данным. Показано, что большинство существующих методов опираются преимущественно на математические приёмы регуляризации некорректно поставленных задач и не учитывают физические закономерности изменения спектра при распространении электронов в воздухе

В **заключении** главы сформулирована постановка задачи диссертационного исследования — необходимость разработки метода восстановления энергетического спектра ускоренных электронов по экспериментально измеренным центрально-осевым глубинным дозовым распределениям, учитывающего ослабление пучка в воздухе, и формирования на его основе методики дозиметрического планирования радиационной обработки объектов произвольной формы и химического состава.

Во **второй главе** описываются методики экспериментальных исследований и детали компьютерного моделирования, приводится перечень оборудования и программного обеспечения, использованного в работе.

Экспериментальные измерения глубинных дозовых распределений проводились на трех импульсных линейных ускорителях электронов:

1. УЭЛР-10-15-С (НИИЯФ МГУ совместно с АО НПП «ТОРИЙ», Россия; $E_{\max} = 10$ МэВ), расположенном в Калужском научно-техническом предприятии «КОРАД» (ранее «Теклеор»);
2. Mevex MB 10-30 SC900 (Mevex, Канада; $E_{\max} = 10$ МэВ), расположенном в центре электронно-лучевой обработки «Axenter», г. Дубна;
3. Varian TrueBeam (Varian Medical Systems, США; $E_{\max} = 9$ МэВ), расположенном в НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко.

Глубинные дозовые распределения на ускорителе УЭЛР-10-15-С измерялись с использованием специально изготовленного по технологии 3D-печати фантома кубической формы из пищевого пластика PETG. Фантом состоял из 25 пластин размерами $(100 \times 100 \times 2.5)$ мм³ с пазами для закрепления дозиметрических плёнок СО ПД(Ф)Р-5/50 и СО ПД(Э)-1/10 (ВНИИФТРИ, Россия). Измерения на промышленном ускорителе MB 10-30 SC900 проводились с использованием стандартного алюминиевого дозиметрического клина. Оптическая плотность дозиметрических плёнок определялась на спектрофотометре ПЭ-5400ВИ («ЭКРОСХИМ», Россия).

Для измерения глубинных дозовых распределений на медицинском линейном ускорителе Varian TrueBeam использовались три типа фантомов:

- водный фантом PTW BEAMSCAN (PTW-Freiburg GmbH, Германия) с цилиндрической ионизационной камерой PTW Semiflex 3D 31021; в фантоме также измерялись поперечные профили дозы;
- водозквивалентный фантом PTW RW3 Slab Phantom, состоящий из 33 пластин «твёрдой воды» размером (30×30) см² и различной толщины: 1, 2, 5, 10 мм. Для измерения распределений поглощенной дозы использовалась плоскопараллельная ионизационная камера PTW Roos Chamber N 34001;
- специально изготовленный алюминиевый фантом, состоящий из 30 алюминиевых пластин $(100 \times 100 \times 0.97)$ мм³, для измерения распределений поглощенной дозы использовалась плоскопараллельная ионизационная камера PTW Roos Chamber N 34001.

Компьютерное моделирование проводилось методом Монте-Карло, реализованном в инструментарии Geant4 (Geant4 collaboration; ЦЕРН, Швейцария) [13–16]. Вычисления осуществлялись на ресурсах ОЯФММП НИИЯФ МГУ с привлечением мощностей облачной платформы «Яндекс.Облако». Всего было проведено более 5,000 моделирований, охватывающих задачи расчёта пространственного распределения поглощённой дозы и моделирования распространения ускоренных электронов в воздухе. Дополнительно моделировался отклик плоскопараллельной ионизационной камеры PTW Roos Chamber N 34001 для пересчёта её показаний в поглощённую дозу в эксперименте с алюминиевым фантомом.

В **третьей главе** изложен разработанный метод восстановления энергетического спектра ускорителя электронов по спектру, измеренному в произвольной удалённой точке на траектории пучка, с использованием распределения Ландау. Глава включает постановку задачи, описание математической модели эволюции спектра, вывод закона изменения энергетического спектра пучка электронов при его распространении в воздухе и его обращение, а также анализ точности и устойчивости предложенного алгоритма.

Для описания результатов компьютерного моделирования распространения моноэнергетических электронов с начальной энергией до 25 МэВ в воздухе использовалась аппроксимация с помощью распределения Ландау:

$$\Phi(E, L) = \lambda \left(\frac{E_0 - E - a(E_0, L)}{b(E_0, L)} \right), \quad (1)$$

где λ – классическое распределение Ландау, $a(E_0, L)$, $b(E_0, L)$ – соответственно параметры сдвига и масштаба, зависящие от начальной энергии электронов E_0 и пройденного ими пути L .

На рис. 1а приведены результаты моделирования в виде энергетического спектра $\Phi(E, L)$ пучка электронов, испущенных из монохроматического источника с энергией $E_0 = 10$ МэВ и прошедших в воздухе путь L до 140 см. Точками на рисунке нанесены результаты моделирования, линиями – их аппроксимация с помощью распределения Ландау:

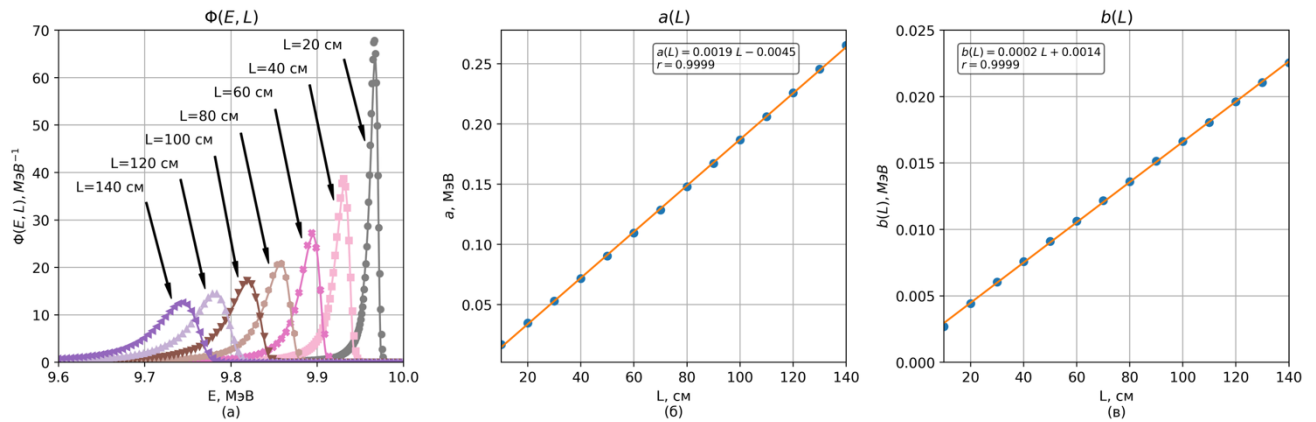


Рисунок 1. (а) Энергетический спектр $\Phi(E, L)$ электронов с начальной энергией 10 МэВ, прошедших в воздухе путь до 140 см (расчет Geant4), (б) зависимость параметра сдвига a от пройденного электронами пути L , (в) зависимость параметра масштаба b от пройденного электронами пути L . Точками нанесены данные моделирования, линиями – аппроксимации.

Установлено, что распределение Ландау точно описывает изменение формы спектра: среднее отклонение аппроксимации от исходных данных в соответствующих точках не превышает 1%. По мере увеличения пути L наблюдается смещение наиболее вероятная энергия в спектре в сторону меньших энергий, а сам спектр становится более широким. На рис. 1б,в приведены зависимости параметров $a(E_0, L)$, $b(E_0, L)$ от пройденного электронами пути L для $E_0 = 10$ МэВ. Оба параметра демонстрируют выраженную линейную зависимость с коэффициентом корреляции 0.9999. Данное поведение аппроксимаций наблюдается для всех E_0 и L , рассмотренных в работе.

На рис. 2а,б приведены зависимости параметров сдвига $a(\xi, L)$ и масштаба $b(\xi, L)$ от начальной энергии электронов ξ для фиксированных $L = 20\text{--}140$ см с шагом 20 см. Оба параметра положительны в исследуемой области энергий. При всех рассмотренных L параметр $a(\xi, L)$ монотонно убывает в области $\xi \lesssim 2$ МэВ, достигает минимума при $\xi \approx 2$ МэВ и далее монотонно возрастает. Минимальное и максимальное значения отличаются от среднего не более, чем на 10%. Параметр $b(\xi, L)$ демонстрирует аналогичное поведение: монотонно убывает при $\xi \lesssim 4$ МэВ достигает минимума при $\xi \approx 4$ МэВ и далее монотонно возрастает. Отличие минимального и максимального значений от среднего также составляет 10%. величина $\exp(a(\xi, L) / b(\xi, L))$ является линейной функцией энергии ξ с коэффициентом корреляции 0.999, благодаря чему параметры $a(\xi, L)$ и $b(\xi, L)$ могут быть выражены друг через друга:

$$\exp\left(\frac{a(\xi, L)}{b(\xi, L)}\right) = k(L) \xi + w(L), \quad (3)$$

$$a(\xi, L) = b(\xi, L) \cdot \ln(k(L) \xi + w(L)), \quad (4)$$

$$b(\xi, L) = \frac{a(\xi, L)}{\ln(k(L) \xi + w(L))}, \quad (5)$$

где k, w – параметры линейной аппроксимации.

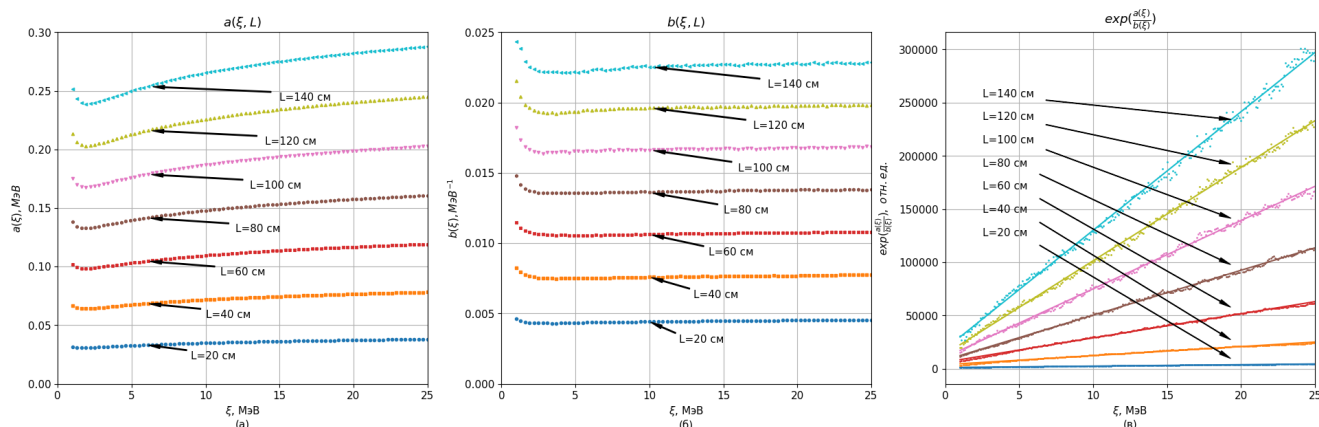


Рисунок 2. Зависимость (а) параметра сдвига $a(\xi, L)$, (б) параметра масштаба $b(\xi, L)$ и (в) $\exp\left(\frac{a(\xi, L)}{b(\xi, L)}\right)$ от энергии электронов, прошедших в воздухе путь $L = 20 - 140$ см с шагом 20 см.

Для построение аналитического выражения, описывающего энергетический спектр $\Phi(E, L)$ электронов, прошедших в воздухе путь L , параметры $a(\xi, L)$, $b(\xi, L)$ аппроксимировались гладкими функциями:

$$a(\xi, L) = a_0(L) \exp(-a_1(L) \xi) - \frac{a_2(L)}{(\xi - a_3(L))^2 + a_4(L)} + a_5(L), \quad (6)$$

$$\frac{1}{b(\xi, L)} = b_0(L) \left(\frac{b_1(L)}{(\xi + b_2(L))^2} + b_3(L) + \exp(-b_4(L) \xi + b_5(L)) \right), \quad (7)$$

где $a_0(L), b_0(L); a_1(L), b_1(L); \dots a_5(L), b_5(L)$ – параметры аппроксимации, значения которых приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1. Значения параметров $a_0(L) \dots a_5(L)$ аппроксимации $a(\xi, L)$ функцией (6) для $L = 10 - 130$ см с шагом 10 см.

| L, см | $a_0, \text{МэВ}^{-1}$ | $a_1, -$ | $a_2, \text{МэВ}^{-2}$ | $a_3, \text{МэВ}$ | $a_4, \text{МэВ}^2$ | $a_5, -$ |
|-------|------------------------|----------|------------------------|-------------------|---------------------|----------|
| 10 | 0.244694 | -3.80388 | 0.763928 | -1.9735 | 26.01608 | 0.01942 |
| 20 | 0.257279 | -3.03886 | 1.383734 | -1.66514 | 23.40958 | 0.039775 |
| 30 | 0.261193 | -2.60119 | 2.00841 | -1.52675 | 22.72272 | 0.060526 |
| 40 | 0.259513 | -2.31155 | 2.70329 | -1.51448 | 23.08757 | 0.081615 |
| 50 | 0.257848 | -2.1153 | 3.405033 | -1.57888 | 23.62329 | 0.102884 |
| 60 | 0.257967 | -1.94097 | 4.080485 | -1.6108 | 23.5991 | 0.124292 |
| 70 | 0.264037 | -1.76185 | 4.569946 | -1.53879 | 22.3344 | 0.14567 |
| 80 | 0.27196 | -1.58502 | 4.954949 | -1.41201 | 20.75979 | 0.167062 |
| 90 | 0.275748 | -1.42991 | 5.441389 | -1.3091 | 19.94225 | 0.188714 |
| 100 | 0.276229 | -1.31047 | 5.986764 | -1.23991 | 19.77277 | 0.210506 |
| 110 | 0.27689 | -1.2079 | 6.520349 | -1.18794 | 19.66833 | 0.232378 |
| 120 | 0.276741 | -1.1193 | 7.084072 | -1.15284 | 19.72808 | 0.254367 |
| 130 | 0.278963 | -1.03631 | 7.531185 | -1.11068 | 19.49474 | 0.276278 |
| 140 | 0.279253 | -0.9698 | 8.077955 | -1.10779 | 19.59715 | 0.298371 |

Таблица 2. Значения параметров $b_0, b_1 \dots b_5$ аппроксимации $b(\xi, L)$ функцией (7) для $L = 10 - 140$ см с шагом 10 см.

| L, см | $b_0, \text{МэВ}^{-1}$ | $b_1, \text{МэВ}^{-2}$ | $b_2, \text{МэВ}$ | $b_3, -$ | $b_4, \text{МэВ}^{-1}$ | $b_5, -$ |
|-------|------------------------|------------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|
| 10 | 391.5456 | -0.08533 | 0.179163 | 0.906285 | 0.10264 | -2.11873 |
| 20 | 232.9448 | -0.06265 | -0.16604 | 0.936656 | 0.086235 | -2.43786 |
| 30 | 169.202 | -0.15088 | 0.133839 | 0.950641 | 0.091869 | -2.50796 |
| 40 | 133.8601 | -0.17234 | 0.214633 | 0.954255 | 0.072664 | -2.65955 |
| 50 | 111.1299 | -0.28056 | 0.593759 | 0.962052 | 0.083515 | -2.71128 |
| 60 | 95.05537 | -0.18592 | 0.386698 | 0.967769 | 0.0792 | -2.9506 |
| 70 | 83.05547 | -0.10554 | 0.065547 | 0.971165 | 0.07381 | -3.12364 |
| 80 | 73.79214 | -0.06189 | -0.18814 | 0.974958 | 0.070726 | -3.28011 |
| 90 | 66.74451 | -0.04024 | -0.37257 | 0.968157 | 0.05838 | -3.2238 |
| 100 | 61.12904 | -0.07012 | -0.23232 | 0.97319 | 0.148672 | -3.09529 |
| 110 | 56.21163 | -0.10372 | -0.11929 | 0.972403 | 0.187619 | -2.80564 |
| 120 | 52.01749 | -0.17673 | 0.090416 | 0.971786 | 0.217614 | -2.51367 |
| 130 | 48.6007 | -0.27354 | 0.291144 | 0.966825 | 0.224439 | -2.30219 |
| 140 | 45.38332 | -0.54604 | 0.805291 | 0.967397 | 0.215541 | -2.10072 |

На основе полученных результатов предложена модель изменения энергетического спектра в зависимости от пройденного электронами пути в воздухе в интегральной форме:

$$\Phi(E, L) = \Lambda(L) [\Phi_0(E)] = \int_0^{E_{max}} \Phi_0(\xi) \lambda \left(\frac{\xi - E - a(\xi, L)}{b(\xi, L)} \right) d\xi, \quad (8)$$

где Φ_0 – спектр электронов на выходе из источника, E_{max} – максимальная энергия в спектре Φ_0 . Показано, что преобразование (8) обладает полугрупповым свойством эволюционных операторов:

$$\Lambda(L_1 + L_2) = \Lambda(L_1) \circ \Lambda(L_2), \quad (9)$$

т.е. действие на спектр оператором при длине пути $L_1 + L_2$ равнозначно последовательному действию операторов при L_1 и L_2 .

Для решения обратной задачи восстановления спектра источника электронов $\Phi_0(\xi)$ по энергетическому спектру $\Phi(E, L)$ электронов, прошедших в воздухе путь L уравнение (8) приводится к матричному виду:

$$\Phi = \Lambda(L) \Phi_0, \quad (10)$$

где $\Phi_0 = (\Phi_0^1, \Phi_0^2, \dots, \Phi_0^N)^T$, $\Phi = (\Phi^1, \Phi^2, \dots, \Phi^N)^T$ – энергетический спектр электронов на выходе из ускорителя и после прохождения в воздухе пути L соответственно. Элементы Φ_0^i , Φ^i соответствуют энергии $E^i = E_{min} + i \Delta E$, где $E_{min} = 1$ МэВ – минимальная энергия, рассмотренная в исследовании; $\Delta E = 100$ кэВ – шаг по энергии. Матрица $\Lambda(L) = (\Lambda^{ij})$ задаёт оператор эволюции спектра. Элемент Λ^{ij} соответствует вероятности того, что частица, имевшая на выходе из ускорителя энергию ξ^i , после прохождения воздуха будет зарегистрирована с энергией E^j :

$$\Lambda^{ij}(L) = \lambda \frac{\xi^i - E^j - a(\xi^i, L)}{b(\xi^i, L)}, \quad (11)$$

где $\xi^i = E_{min} + i \Delta E$. Матрица (Λ^{ij}) нормирована так, что для каждой энергии ξ^i сумма вероятностей перехода во все E^j равна единице.

Для решения обратной задачи восстановления спектра Φ_0 по спектру Φ методом SVD-разложения рассчитывалась псевдообратная матрица $\Lambda^+(L)$:

$$\Lambda = U \Sigma V^T \quad (12)$$

$$\Lambda^+ = V \Sigma^+ U^T \quad (13)$$

$$\Phi_0 = \Lambda^+ \Phi, \quad (14)$$

где U, V — ортогональные матрицы, $\Sigma = \text{diag}(\sigma^1, \sigma^2, \dots, \sigma^N)$ — диагональная матрица сингулярных чисел σ^i , $\Sigma^+ = \text{diag}(\frac{1}{\sigma^1}, \frac{1}{\sigma^2}, \dots, \frac{1}{\sigma^N})$.

Исследование данного подхода показало, что при использовании незашумленных данных восстановление исходного спектра выполняется практически идеально: полученные кривые совпадают с оригиналом в пределах погрешности численного метода, а отклонения в отдельных точках не превышают 1%.

Для проверки устойчивости метода в данные искусственно добавлялся мультипликативный шум. Каждая компонента спектра $\Phi(E, L)$ умножалась на случайный фактор:

$$\Phi(E, L) = \Phi(E, L) \cdot (1 + \alpha(1 - 2r)), \quad (15)$$

где r — случайная величина, равномерно распределённая на интервале $[0;1]$; α — параметр, задающий уровень шума. Пример спектра после прохождения пути $L=100$ см с внесением 75%-шума приведён на *рис. 3а*. В качестве опорного спектра был использован экспериментально измеренный [17] спектр ускорителя УЭЛР-10-15-С-60, разработанного НИИЯФ МГУ совместно с АО НПП «Торий» [18]. Для работы с зашумлёнными данными применялась фильтрация сингулярных чисел: при SVD-разложении (13) обратные значения рассчитывались только для σ^i , превышающих среднее значение сингулярных чисел. Остальные обнулялись.

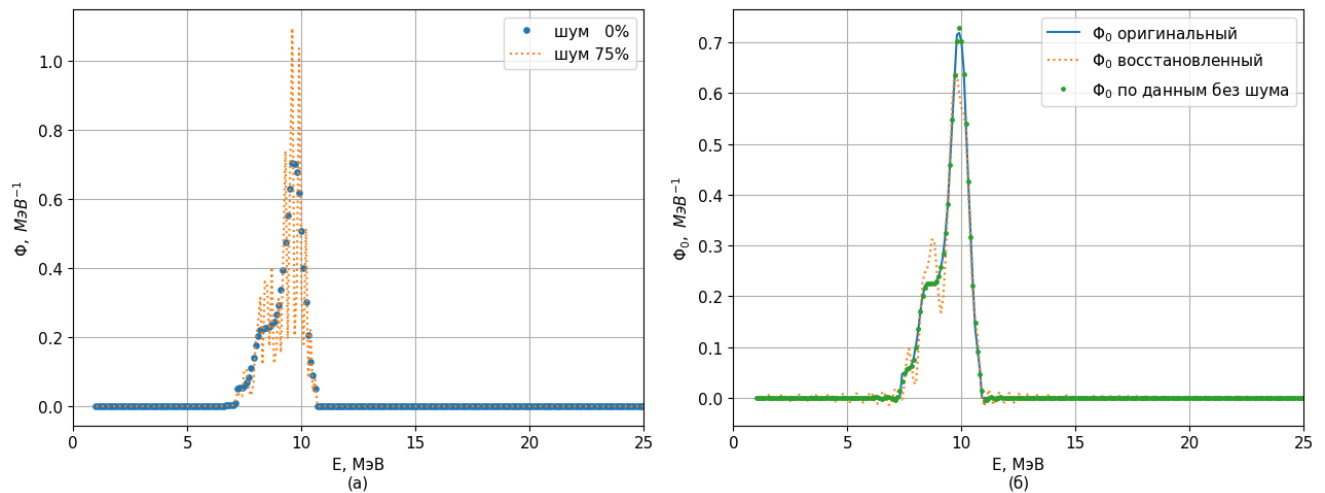


Рисунок 3. (а) энергетический спектр электронов после 100 см в воздухе: без шума (точки) и с искусственно внесённым 75%-шумом (пунктир); (б) исходный (линия) и восстановленные по зашумленным (пунктир) и чистым (точки) данным спектры.

На *рис. 3б* показан исходный спектр, а также спектры, восстановленные по «чистым» и зашумлённым данным. Для чистых данных восстановленный спектр совпадает с изначальным в пределах 1%. Для данных с 75%-зашумлением основная форма спектра воспроизводится корректно, и в большинстве точек расхождение не превышает 5%. Наибольшее отклонение наблюдается в области $E = 6 - 8$ МэВ в виде выброса $\sim 30-50\%$. Также имеются нефизичные осцилляции с амплитудой $\sim 1\%$ от максимума в области, где Φ_0 обращается в ноль. Эти искажения не являются критичными, так как столь высокий уровень шума в реальном эксперименте маловероятен. При более реалистичных уровнях зашумления — 5% и 15% — погрешность восстановления не превышает 3% и 8% соответственно.

В четвертой главе предлагается трёхэтапный метод восстановления энергетического спектра ускорителя электронов по глубинным дозовым распределениям, измеренным вдоль центральной оси в промышленных и клинических дозиметрических фантомах. Глава включает постановку задачи, описание математической модели восстанавливаемого спектра, решение обратной задачи восстановления энергетического спектра по глубинным дозовым распределениям, а также анализ точности и устойчивости предложенного подхода.

Энергетический спектр электронов у поверхности дозиметрического фантома предлагается восстанавливать в виде суммы основной Φ_λ и поправочной $\delta\Phi$ компонент:

$$\Phi(E) = \Phi_\lambda(E) + \delta\Phi(E) \quad (16)$$

Основная компонента спектра представляется в виде распределения Гаусса, прошедшим преобразование (8):

$$\Phi_\lambda(E, \mu, \sigma) = \int_0^{E_{max}} \exp\left(-\frac{(\xi - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \lambda\left(\frac{\xi - E - a(\xi, L)}{b(\xi, L)}\right) d\xi \quad (17)$$

Её восстановление производится на первом этапе предлагаемого метода по глубинному дозовому распределению в области спада дозы $D_\lambda(x)$:

$$\mu, \sigma = \arg \min_{\mu', \sigma'} \left\| D_\lambda(x) - \int \Phi_\lambda(E, \mu', \sigma') D_0(E, x) dE \right\|^2, \quad (18)$$

где $D_0(E, x)$ – «дозовое ядро»: глубинные дозовые распределения вдоль центральной оси параллелепипеда из известного материала, создаваемые параллельным пучком моноэнергетических электронов, испущенных вплотную к поверхности фантома.

На втором этапе по «оставшемуся» глубинному дозовому распределению D_{res} методом регуляризации Тихонова восстанавливается поправочная компонента спектра $\delta\Phi$:

$$D_{res}(x) = D(x) - D_\lambda^*(x) \quad (19)$$

$$D_\lambda^*(x) = \int \Phi_\lambda(E, \mu, \sigma) D_0(E, x) dE, \quad (20)$$

$$\delta\Phi = \arg \min_{\delta\Phi'} \left\{ \left\| D_{res}(x) - \int \delta\Phi' D_0(E, x) dE \right\|^2 + \alpha^2 \|\delta\Phi'\|^2 \right\} \quad (21)$$

Здесь $D(x)$ – экспериментально измеренное глубинное дозовое распределение, α – параметр регуляризации;

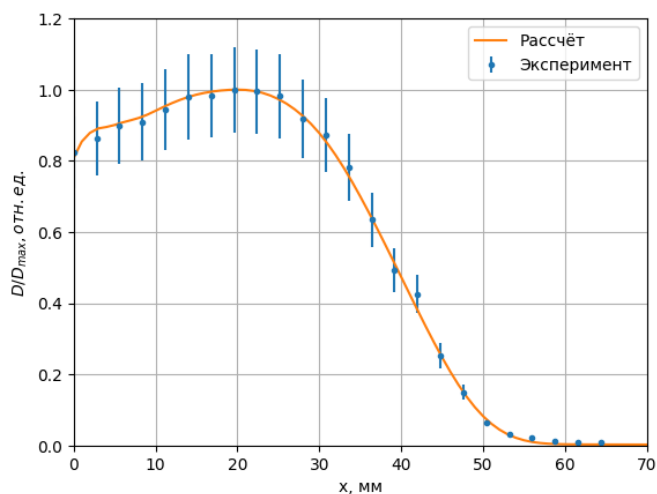
На третьем этапе по энергетическому спектру у поверхности дозиметрического фантома восстанавливается энергетический спектр источника Φ_0 с использованием разработанного метода на основе SVD-разложения с фильтрацией сингулярных чисел:

$$\Phi_0 = \Lambda^+(\Phi_\lambda + \delta\Phi), \quad (22)$$

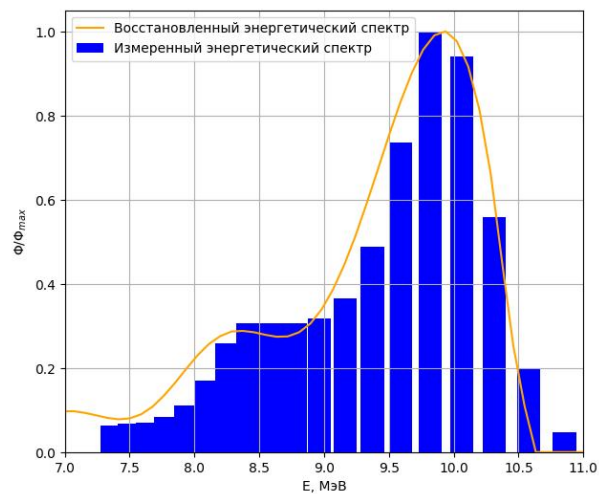
где $\Phi_\lambda, \delta\Phi$ – основная и поправочная компоненты энергетического спектра электронов у поверхности дозиметрического фантома, записанные в виде векторов, Λ^+ – псевдообратная матрица (13).

Экспериментальная проверка разработанного метода была проведена на промышленном ускорителе электронов УЭЛР-10-15С с известным энергетическим спектром [17] и клиническом ускорителе Varian TrueBeam. Конструктивной особенностью ускорителей данной серии является наличие поворотного магнита, обеспечивающего формирование на выходе практически моноэнергетического спектра электронов. Хотя прямое измерение спектра не проводилось, корректность восстановления оценивалась по степени совпадения восстановленного распределения с ожидаемым моноэнергетическим видом спектра.

На *рис. 5а* приведены измеренные на ускорителе УЭЛР-10-15С глубинные дозовые распределения в фантоме из PETG-пластика, а также экспериментально измеренный и восстановленный энергетический спектр электронов (*рис. 5б*). Из рисунка видно совпадение общей формы спектров. Исследование устойчивости метода показало, что введение во входные данные искусственного шума до 25% не привело к значительному ухудшению точности восстановления спектра.



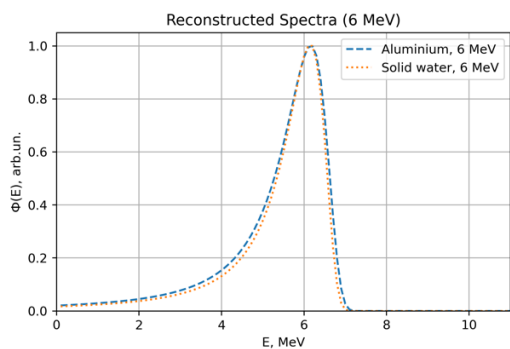
а



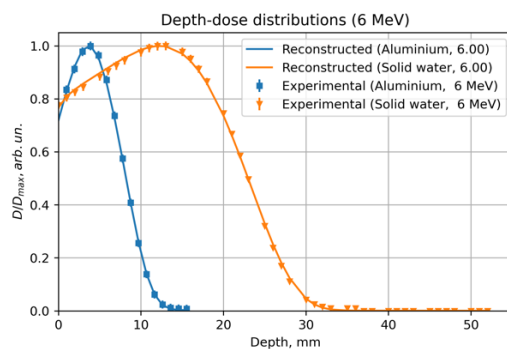
б

Рисунок 5. (а) Экспериментально измеренное (синие точки) на ускорителе электронов УЭЛР-10-15-С и соответствующее восстановленному спектру (оранжевая кривая) глубинное дозовое распределение в PETG-пластике. (б) Измеренный [17] (синие столбцы) и восстановленный по измеренным глубинным дозовым распределениям (оранжевая кривая) энергетический спектр пучка ускорителя электронов УЭЛР-10-15-С.

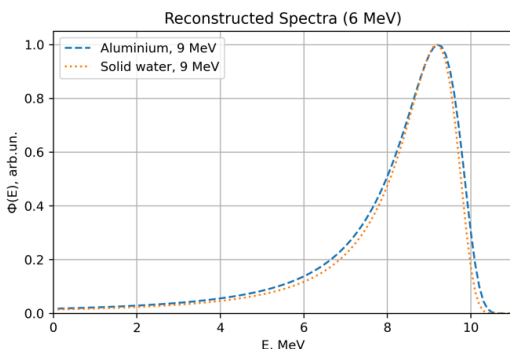
На рис. 6 представлены результаты восстановления спектров и сравнения рассчитанных по ним глубинных дозовых распределений с экспериментальными данными. Видно, что восстановленные спектры для алюминиевого и водозквивалентного фантомов отклоняются друг от друга не более, чем на 5% в соответствующих точках. Расчётные глубинные дозовые распределения, полученные из восстановленных спектров, согласуются с экспериментальными: отклонение не превышает 2% для режима 6 МэВ и 5% для режима 9 МэВ. Наилучшее совпадение наблюдается в области максимума дозы, наибольшие расхождения — в приповерхностных слоях (≤ 5 мм) и на глубинах ≥ 35 мм для фантома из «твёрдой воды» для режима работы 9 МэВ.



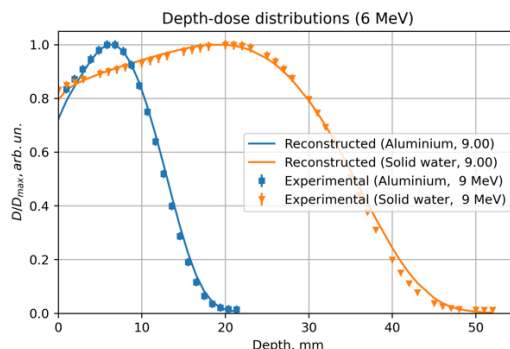
а



б



в



г

Рисунок 6. Энергетические спектры пучка электронов у поверхности дозиметрических фантомов, восстановленные по экспериментально измеренным глубинным дозовым распределениям в алюминии (синие пунктирные линии) и «твёрдой воде» (оранжевые штрихпунктирные линии) на ускорителе электронов Varian TrueBeam, работающем в режимах (а) 6 МэВ и (в) 9 МэВ. Синие точки и оранжевые квадраты соответствуют экспериментально измеренным глубинным дозовым распределениям в алюминии и «твёрдой воде» соответственно для режимов работы ускорителя: (б) 6 МэВ и (г) 9 МэВ. Сплошными линиями нанесены аналитические глубинные дозовые распределения, рассчитанные по восстановленным энергетическим спектрам.

Глубинное дозовое распределение, соответствующее основной компоненте восстановленного спектра $\Phi_\lambda(E, \mu, \sigma)$, с высокой точностью совпадало с экспериментально измеренными распределениями поглощённой дозы во всём диапазоне глубин. В связи с этим второй и третий этапы метода были опущены. Параметры гауссовой части восстановленных спектров — среднее значение μ и дисперсия σ — приведены в таблице 3. Из таблицы видно, что значения параметров, полученные для алюминиевого и водозэквивалентного фантомов отличаются друг от друга менее, чем на 0.1%. При этом $\sigma = 0.01$, что совпадает с изначальным предположением о близости энергетического спектра ускорителя к моноэнергетическому.

Таблица 3. Параметры восстановленных энергетических спектров ускорителя Varian TrueBeam.

| Среда | Режим работы ускорителя | μ , МэВ | σ , МэВ |
|----------------|-------------------------|-------------|----------------|
| Алюминий | "6 МэВ" | 5.95 | 0.01 |
| «Твердая вода» | "6 МэВ" | 5.95 | 0.01 |
| Алюминий | "9 МэВ" | 8.94 | 0.01 |
| «Твердая вода» | "9 МэВ" | 8.94 | 0.01 |

В **пятой главе** предлагается методика дозиметрического планирования радиационной обработки для радиационно-технических установок (РТУ) на базе ускорителей электронов. Глава включает математическое описание процесса планирования и экспериментальную проверку разработанной методики.

Процесс дозиметрического планирования радиационной обработки предлагается разбить на четыре этапа (рис. 10):

1. восстановление энергетического спектра ускоренных электронов по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям с учетом изменения спектра электронов по мере их распространения в воздухе;
2. расчет абсолютного значения поверхностной дозы как функции от параметров РТУ;
3. расчет распределения относительной поглощенной дозы по объему планируемого объекта;
4. выбор оптимального режима обработки.

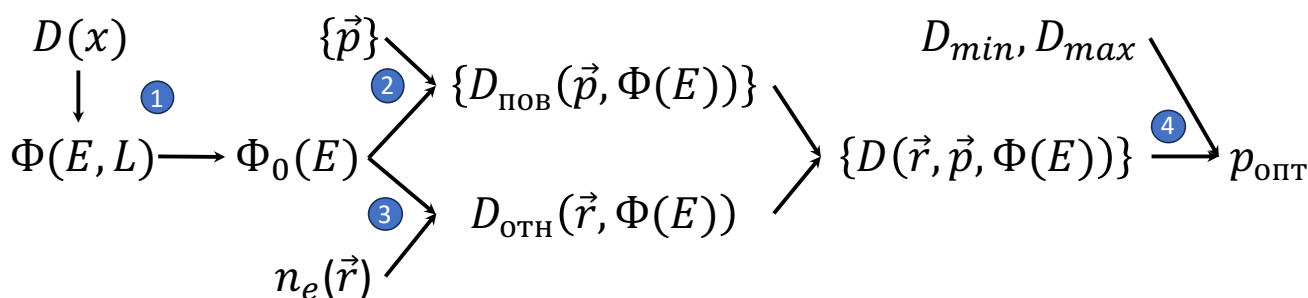


Рисунок 10. Блок-схема планирования радиационной обработки для РТУ на базе ускорителей электронов. Здесь $D(x)$ – экспериментально измеренное центрально-осевое глубинное дозовое

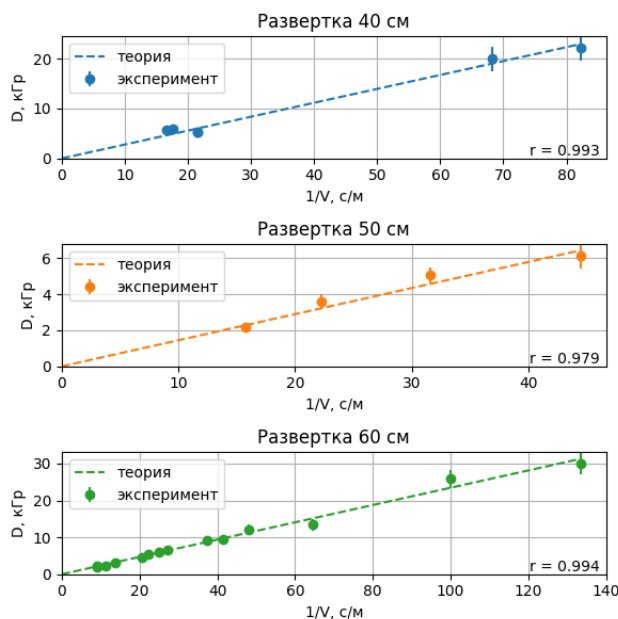
распределение; $\Phi(E)$ – энергетический спектр ускорителя электронов, восстановленный с помощью разработанного трёхэтапного метода; $\{\vec{p}\}$ – множество всех реализуемых комбинаций параметров работы РТУ, таких как: импульсный ток пучка, длительность импульса, частота следования импульсов, ширина развертки пучка и скорость конвейера; $n_e(\vec{r})$ – распределение электронной плотности в объеме объекта; $\{D_{\text{пов}}(\vec{p}, \Phi(E))\}$ – множество значений поверхностной дозы, соответствующих параметрам $\{\vec{p}\}$ и энергетическому спектру ускоренных электронов $\Phi(E)$; $D_{\text{отн}}(\vec{r}, \Phi(E))$ – распределение относительной поглощенной дозы по объему планируемого объекта, соответствующее спектру $\Phi(E)$; $\{D(\vec{r}, \vec{p}, \Phi(E))\}$ – множество распределений поглощенной дозы по объему планируемого объекта, соответствующее параметрам $\{\vec{p}\}$ и энергетическому спектру $\Phi(E)$; $p_{\text{опт}}$ – комбинация параметров работы РТУ, обеспечивающая оптимальную радиационную обработку. $D_{\text{min}}, D_{\text{max}}$ – минимальная и максимальная дозы в области интереса, соответственно.

Для расчёта абсолютного значения поверхностной дозы $D_{\text{пов}}$ как функции параметров РТУ – импульсного тока пучка $I_{\text{имп}}$, длительности импульса Δt , частоты следования импульсов $F_{\text{имп}}$, ширины развертки пучка W , скорости конвейера $V_{\text{конв}}$ и энергетического спектра ускоренных электронов $\Phi(E)$ – предлагается использовать соотношение:

$$D_{\text{пов}}(\vec{p}, \Phi(E)) = \frac{I_{\text{имп}} \Delta t}{e} \frac{F_{\text{имп}}}{W V_{\text{конв}}} \int_0^{E_{\text{max}}} -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}(E) \Phi(E) dE, \quad (23)$$

где e – заряд позитрона, ρ – плотность облучаемого объекта, $-\frac{dE}{dx}(E)$ – удельные ионизационные потери энергии электронов с энергией E в объекте, $\Phi(E)$ – энергетический спектр ускорителя.

На рис. 11а приведены результаты экспериментальной проверки формулы (23) на ускорителе электронов Mevex MB 10-30 SC900 при фиксированных значениях тока и длительности импульса для трех значений ширины развертки пучка: 40, 50 и 60 см. Расчётные значения поверхностной дозы, полученные по формуле (23), хорошо согласуются с экспериментальными результатами, находясь в пределах погрешности измерений. Коэффициент корреляции зависимости $D_{\text{пов}}(1/V_{\text{конв}})$ составил не менее 0.979. Формула (23) положена в основу системы «Demetra» (рис. 11б), предназначенной для автоматизации выбора параметров работы РТУ.



(а)

Figure 11b shows the Demetra software interface. It includes input fields for beam parameters (Length, Width, Mass, Dose) and conveyor parameters (Speed, Frequency, etc.). There are buttons for "РАССЧИТАТЬ ПАРАМЕТРЫ РТУ" and "КАЛИБРОВАТЬ СХЕМУ ОБЛУЧЕНИЯ". A table shows expected uniformity for different beam widths.

| Одно- / двустороннее облучение | 0 мм | ... | ... |
|-----------------------------------|------|-----|-----|
| Ширина развертки (см) | ... | ... | ... |
| Энергия электронов (МэВ) | ... | ... | ... |
| Импульсный ток (А) | ... | ... | ... |
| Длительность импульса (мкс) | ... | ... | ... |
| Частота следования импульсов (Гц) | ... | ... | ... |
| Частота развертки (Гц) | ... | ... | ... |
| Скорость конвейера (см/с) | ... | ... | ... |
| $D_{\text{min}} / D_{\text{max}}$ | ... | ... | ... |
| $D_{\text{max}} / D_{\text{min}}$ | ... | ... | ... |

(б)

Рисунок 11. (а) Поверхностная доза, измеренная при разной скорости конвейера на ускорителе Mevex MB 10-30 SC900 при фиксированных значениях тока и длительности импульса для ширины развертки 40, 50 и 60 см; точками нанесены экспериментальные данные,

пунктиром – значения, рассчитанные по формуле (23). (б) Графический пользовательский интерфейс системы «Demetra».

Для расчета распределения относительной поглощенной дозы $D_{отн}(\vec{r}, \Phi(E))$ по объему объектов произвольной формы и химического состава предлагается использовать алгоритм, схематично изображенный на рис. 12. Входными данными служат энергетический спектр ускоренных электронов, трёхмерная модель объекта (файл в формате «obj», «ply» либо «stl») и его химический состав. На основе переданных данных проводится компьютерное моделирование с использованием инструментария Geant4 для расчёта пространственного распределения дозы методом Монте-Карло. Объем объекта разбивается виртуальной сеткой на воксели, в каждом из которых регистрируется величина поглощенной дозы. Результат моделирования – трёхмерное дозовое распределение, нормированное на дозу в контрольной точке на поверхности объекта, значение которой может быть получено экспериментально.

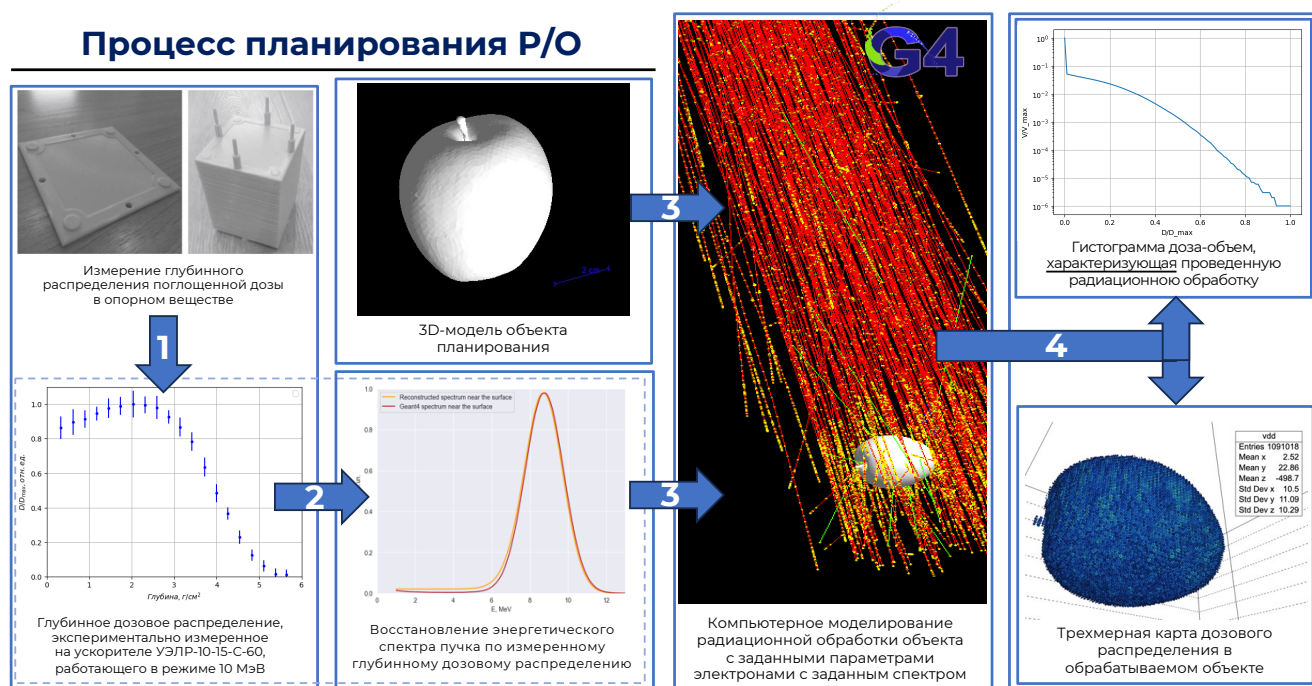


Рисунок 12. Методика расчета распределения относительной поглощенной дозы по объему объектов произвольной формы и химического состава.

Для выбора комбинации параметров работы РТУ $p_{опт}$, обеспечивающей оптимальную радиационную обработку, из множества всех реализуемых комбинаций параметров работы РТУ $\{\vec{p}\}$, которым соответствуют дозовые распределения $\{D(\vec{r}, \vec{p}, \Phi(E))\}$, целесообразно руководствоваться следующими критериями. Во-первых, во всех точках объекта доза обязана лежать в диапазоне от D_{min} до D_{max} , что формально выражается условием:

$$D_{min} \leq D(\vec{r}, \vec{p}, \Phi(E)) = D_{пов}(\vec{p}, \Phi(E)) \cdot D_{отн}(\vec{r}, \Phi(E)) \leq D_{max} \quad (24)$$

Во-вторых, среди параметров, удовлетворяющих дозовому ограничению, предпочтение следует отдавать тем, при которых потребляемая мощность минимальна. Это соответствует минимизации величины:

$$P \sim \frac{I_{имп} \Delta t}{e} F_{имп} dt \int_0^{E_{max}} E \Phi(E) dE \rightarrow min \quad (25)$$

Наконец, при прочих равных оптимальной считается конфигурация параметров, обеспечивающая максимальную скорость движения конвейера.

Экспериментальная проверка методики для объектов составной геометрии выполнена на примере полимерных трубок V1(к) 36/55×9-1400 и V1(4) 45/59×7-1400, предоставленных ООО «РИКА ГРУПП» (рис. 13в, красные и черные трубки соответственно). Диаметры трубок составляют 55 и 59 мм, толщина стенок – 9.5 и 7 мм, соответственно. Облучение осуществлялось

укладкой в три слоя. Из рисунка видно, что рассчитанные с использованием Geant4 пространственные дозовые распределения (рис. 13б,е) согласуются в пределах погрешности с экспериментально измеренными значениями (рис. 13а,д) в точках на внутренней и внешней поверхности трубок.

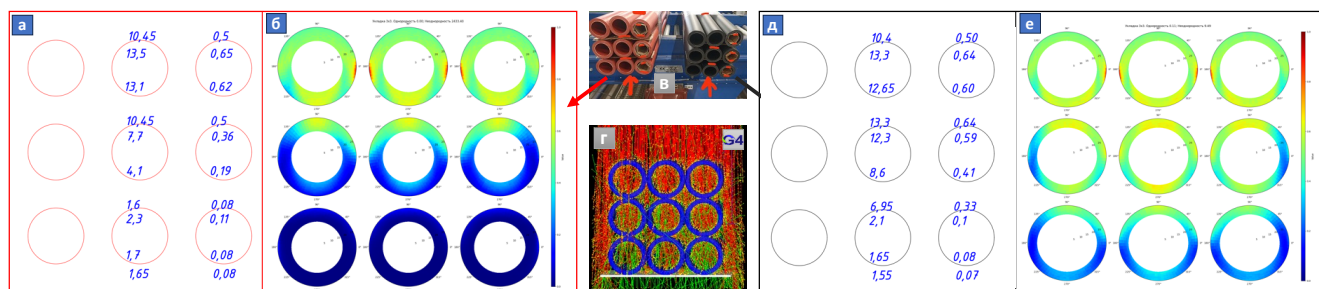


Рисунок 13. Сравнение экспериментально измеренных доз (а, д) в полимерных трубках с различным диаметром с результатами моделирования (б, е); (в) схема эксперимента; (д) геометрия моделирования.

В отдельном эксперименте (рис. 14) по облучению трубок укладкой в один слой были измерены поглощенные дозы в точках соприкосновения трубок, для которых моделирование (рис. 14б,д) предсказывает двукратную дозу относительно поверхностной. Экспериментальные измерения (рис. 14а,г) это подтверждают.

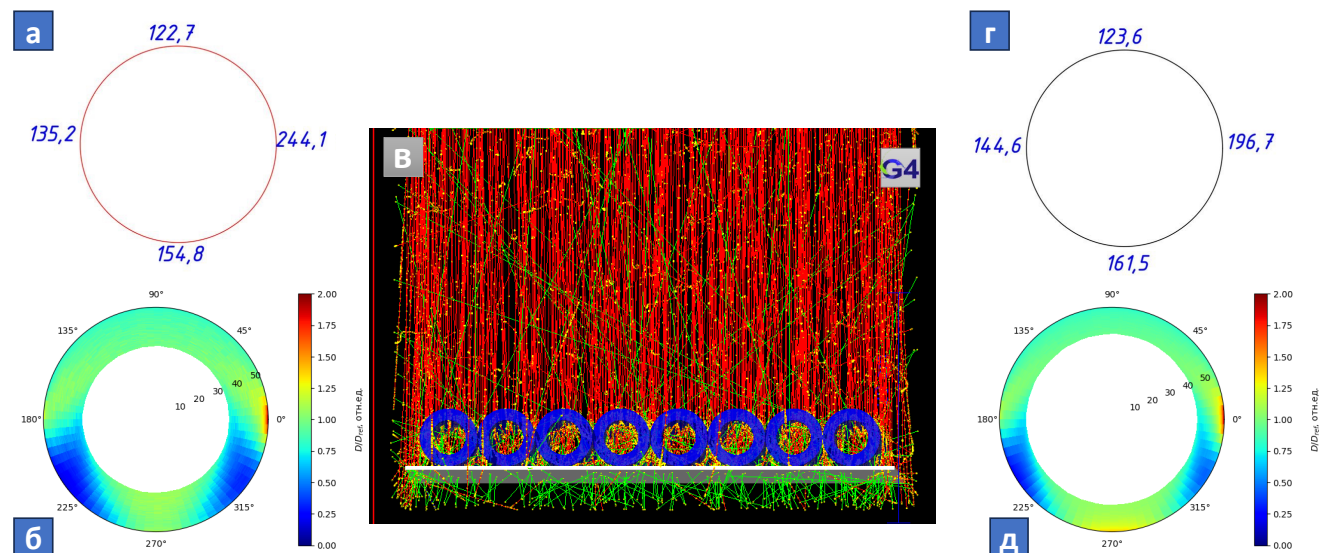


Рисунок 14. Сравнение экспериментально измеренных доз (а,г) в полимерных трубках с результатами моделирования (б,д); (в) геометрия моделирования.

В заключении диссертации изложены основные **выводы**:

1. Установлена зависимость изменения энергетического спектра ускоренных электронов по мере их распространения в воздухе для энергий до 25 МэВ и пути в воздухе до 140 см. Показано, что изменение спектра описывается интегральной свёрткой спектра источника с ядром, выражающимся через распределения Ландау. Полученное преобразование обладает полугрупповым свойством эволюционных операторов, что позволяет описывать изменение спектра на произвольном расстоянии как последовательное действие операторов для отдельных участков траектории.
2. Разработан и реализован метод восстановления энергетического спектра источника электронов по спектру, измеренному в произвольной точке на траектории пучка. Для решения обратной задачи использован метод SVD-разложения с фильтрацией малых сингулярных чисел, обеспечивающий устойчивость решения при зашумлении данных до 75%.

3. Предложен трёхэтапный метод восстановления энергетического спектра ускорителя электронов по центрально-осевым глубинным дозовым распределениям, измеренным в промышленных и клинических фантомах. Метод обеспечивает устойчивость формы восстановленного спектра относительно параметра регуляризации в методе А.Н. Тихонова и позволяет восстанавливать спектр с шагом 0.1 МэВ и погрешностью не более 5%.
4. Экспериментальная проверка разработанных методов показала согласие восстановленных энергетических спектров с экспериментально измеренными в пределах 5%.
5. Теоретические результаты, полученные в ходе исследования, положены в основу систем дозиметрического планирования радиационной обработки «Demetra» и «DosePreview». Системы прошли экспериментальную проверку и внедрены в практику дозиметрического планирования в центре промышленной радиационной обработки «Ахентер» (г. Дубна).

Приложение к диссертации содержит копии свидетельств о государственной регистрации прав на программы для ЭВМ.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук:

1. **Zolotov, S.A.** Landau distribution-based regularized algorithm for reconstruction of electron beam energy spectrum using depth dose distributions in targeted materials / **Zolotov S.A.**, Bliznyuk U.A., Nikitchenk A.D., Studenikin F.R., Antipina N.A., Borshchegovskaya P.Yu., Chernyaev A.P., Ipatova V.S., Toropygin M.I., Nikolaeva A.A. // Physica Scripta – 2025. – Vol.100, № 4. – P.045020; Импакт-фактор 2.6 (JIF), **Q2**; 1.2 п.л.; EDN: PGEGVM
2. Kozlova, E.K. Optimization Function for Determining Optimal Dose Range for Beef and Seed Potato Irradiation / Kozlova Elena, Bliznyuk Ulyana, Chernyaev Alexander, Borshchegovskaya Polina, Braun Arcady, Ipatova Victoria, **Zolotov Sergey**, Nikitchenko Alexander, Chulikova Natalya, Malyuga Anna, Zubritskaya Yana, Bolotnik Timofey, Oprunenko Anastasia, Kozlov Aleksandr, Beklemishev Mikhail, Yagudina Roza, Rodin Igor // Foods – 2024. – Vol.13., № 23 – P.3729; Импакт-фактор 5.1 (JIF), **Q1**; 3 п.л.; EDN: NIELWW
3. **Zolotov, S.A.** DosePreview Software for Rapid Planning of Radiation Processing of Biological Objects and Materials / **Zolotov S.A.**, Bliznyuk U.A., Antipina N.A., Nikitchenko A.D., Nikolaeva A.A., Studenikin F.R., Chernyaev A.P. // Physics of Atomic Nuclei – 2024. – Vol.87, Suppl 3. – P.S452-S.460; Импакт-фактор 0.4 (JIF), **Q4**; 0.6 п.л. EDN: DNYQHX
4. Чуликова, Н.С. Радиационная обработка семенного картофеля как метод подавления различных форм ризоктониоза на клубнях нового урожая / Н.С. Чуликова, А.А. Малюга, У.А. Близнюк, П.Ю. Борщеговская, **С.А. Золотов**, Я.В. Зубрицкая, В.С. Ипатова, А.П. Черняев, И.А. Родин // Агрохимия – 2023. - № 2. – С.69-78; Импакт-фактор 0.332 (РИНЦ); 1.2 п.л.; EDN: MSHQZY
Chulikova, N.S. Radiation Processing of Seed Potatoes as a Method for Suppressing Various Forms of Rhizoctonia in New Crop Tubers // Chulikova N.S., Malyuga A.A., Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Yu., **Zolotov S.A.**, Zubritskaya Ya.V., Ipatova V.S., Chernyaev A.P., Rodin I.A. // Russian agricultural sciences – 2023 – Vol.49, Suppl 1 – P.S104-S112; Импакт-фактор 0.332 (РИНЦ); 1.2 п.л.; EDN: KQSUTQ
5. Близнюк, У.А. Восстановление глубинных распределений поглощенной дозы при прохождении пучков электронов через вещество / Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., **Золотов С.А.**, Ипатова В.С., Крусанов Г.А., Никитченко А.Д., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П. // Физика элементарных частиц и атомного ядра – 2023. – Т.54, № 4. – С. 728-737; Импакт-фактор 0.485 (РИНЦ); 0.8 п.л.; EDN: IHPHEV
Bliznyuk U.A., Reconstruction of Depth Dose Distributions in Materials Created by Electron Beam / Bliznyuk U.A., Borshchegovskaya P.Yu., **Zolotov S.A.**, Ipatova V.S., Krusanov G.A., Nikitchenko A.D., Studenikin F.R., Chernyaev A.P. // Physics of Particles and Nuclei – 2023. – Vol.54. – P. 575-580; Импакт-фактор 0.5 (JIF), **Q3**; 0.8 п.л.; EDN: LSHIHT

6. **Золотов, С.А.** Комбинация алюминиевых пластин различной толщины для повышения однородности радиационной обработки ускоренными электронами / **Золотов С.А.,** Близнюк У.А., Студеникин Ф.Р., Борщеговская П.Ю., Крусанов Г.А. // Письма в ЭЧАЯ – 2023 – Т.20, № 4(249); Импакт-фактор 0.274 (РИНЦ); 0.6 п.л.; EDN: FNRKXL
Zolotov, S.A. Combination of Aluminum Plates of Different Thicknesses to Increase the Homogeneity of Radiation Treatment by Accelerated Electrons / Zolotov S.A., Bliznyuk U.A., Studenikin F.R., Borshchegovskaya P.Yu., Krusanov G.A. // Physics of Particles and Nuclei Letters – 2023. – Vol.20. – P.954-958; Импакт-фактор 0.4 (JIF), **Q4**; 0.6 п.л.; EDN: YMTFLC
7. Chulikova, N.S. Electron Beam Irradiation to Control Rhizoctonia solani in Potato / Chulikova Natalya, Malyuga Anna, Borshchegovskaya Polina, Zubritskaya Yana, Ipatova Victoria, Chernyaev Alexander, Yurov Dmitry, **Zolotov Sergei**, Nikitchenko Alexander, Bliznyuk Ulyana, Rodin Igor // Agriculture-Basel – 2023. – Vol.13, № 6. – P.1221; Импакт-фактор 3.6 (JIF), **Q1**; 2 п.л.; EDN: WXKDDQ
8. Studenikin, F.R. Electron beam modification for improving dose uniformity in irradiated objects / Studenikin F.R., Bliznyuk U.A., Chernyaev A. P., Krusanov G.A., Nikitchenko A.D., **Zolotov S.A.**, Ipatova V.S. // European Physical Journal: Special Topics – 2023. – Vol.232. – P.1631-1635; Импакт-фактор 2.3 (JIF), **Q2**; 0.6 п.л.; EDN: TKYBTG
9. Чуликова, Н.С. Влияние пучка ускоренных электронов с энергией 1 МэВ на рост и микрофлору картофеля / Чуликова Н.С., Малюга А.А., Близнюк У.А., Черняев А.П., Борщеговская П.Ю., **Золотов С.А.**, Никитченко А.Д., Зубрицкая Я.В., Юров Д.С. // Известия РАН. Серия физическая – 2022. – Т.86, № 12. – С. 1817-1824; Импакт-фактор 0.695 (РИНЦ); 1 п.л.; EDN: AYDYPE
Chulikova, N.S. Impact of 1-MeV Election Beam Irradiation on the Phenology and Microflora of Potatoes / Chulikova N.S., Malyuga A.A., Bliznyuk U.A., Chernyaev A.P., Borschegovskaya P.Yu., **Zolotov S.A.**, Nikitchenko A.D., Zubritskaya Ya.V., Yurov D.S. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics – 2022. – Vol.86, № 12. – P. 1549-1556; Импакт-фактор 0.253 (SJR), **Q3**; 1 п.л.; EDN: IYCPME

Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. DEMETRA by IRT : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669934 / А.П. Черняев, В.В. Ханкин, У.А. Близнюк, **С.А. Золотов**, Ф.Р. Студеникин; правообладатель – ООО «Промышленные радиационные технологии». — 22.09.2023.
2. Dose Preview by IRT : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023669628 / А.П. Черняев, В.В. Ханкин, У.А. Близнюк, **С.А. Золотов**, Ф.Р. Студеникин; правообладатель – ООО «Промышленные радиационные технологии». — 18.09.2023.
3. Система планирования промышленной радиационной обработки "Туя" : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025691280 / **Золотов С.А.**, Близнюк У.А., Борщеговская П.Ю., Никитченко А.Д., Родин И.А., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П.; правообладатель — Золотов Сергей Александрович. — 13.11.2025

Список цитируемой литературы

1. Pikaev A. K. Current state of radiation processing // Russian Chemical Reviews. 1995. Т. 64, № 6. С. 569–598.
2. Черняев А. П. и др. Перспективы развития радиационных технологий в России // Ядерная физика. 2019. Т. 82, № 05. С. 425–439.
3. Розанов В. В. и др. МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ В КОСТНОМ ИМПЛАНТАТЕ В ПРОЦЕССЕ РАДИАЦИОННОЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. The Russian Academy of Sciences, 2022. Т. 86. С. 1099–1103.
4. De Lauretis A. и др. Balancing sterilization and functional properties in Poloxamer 407 hydrogels: comparing heat and radiation techniques // Regen Biomater. Oxford University Press, 2025. Т. 12.
5. Османов В. К. Инженерная энзимология: учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Приволжский исследовательский медицинский университет, 2014. 68 с.
6. Malyuga A. A. и др. The effect of accelerated electrons with an energy of 1 MeV on the growth of agricultural plants pathogens // Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2025. № 1. С. 47–58.
7. Chulikova N. S. и др. Radiation Processing of Seed Potatoes as a Method for Suppressing Various Forms of Rhizoctonia in New Crop Tubers // Russ Agric Sci. 2023. Т. 49, № S1. С. S104–S112.
8. Ipatova V. S. и др. Monitoring of the Concentration of Volatile Organic Compounds in Beef Meat after Radiation Processing with Accelerated Electrons // Inorganic Materials. 2024. Т. 60, № 3. С. 292–303.
9. Черняев А. П. и др. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МЭВ НА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОХЛАЖДЕННОЙ ФОРЕЛИ // НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. 2020. Т. 21, № 7. С. 37–45.
10. Bliznyuk U. A. и др. Monitoring the concentration of aldehydes in chicken meat during the storage period after treatment by accelerated electrons // Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2022. Т. 88, № 10. С. 13–19.
11. Черняев А. П. РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. Москва: Издательство Московского Университета, 2019. 233 с.
12. Любомудров А. П., Золотов С. А. ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В ОБЛУЧАЕМЫХ ОБЪЕКТАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ // XXXI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2024». Москва, 2024. С. 906–906.
13. Allison J. и др. Geant4 developments and applications // IEEE Trans Nucl Sci. 2006. Т. 53, № 1. С. 270–278.
14. Allison J. и др. Recent developments in GEANT4 // Nucl Instrum Methods Phys Res A. Elsevier B.V., 2016. Т. 835. С. 186–225.
15. Agostinelli S. и др. GEANT4 - A simulation toolkit // Nucl Instrum Methods Phys Res A. Elsevier B.V., 2003. Т. 506, № 3. С. 250–303.
16. Incerti S., Ivanchenko V., Novak M. Recent progress of Geant4 electromagnetic physics for calorimeter simulation // Journal of Instrumentation. 2018. Т. 13, № 02. С. C02054–C02054.
17. Ханкин В. В. Экспериментальное исследование динамики пучков в импульсном линейном ускорителе и разрезном микротроне. Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020.
18. АО "НПП «ТОРИЙ». УЭЛР-10-15-С-60 линейный ускоритель электронов. 2017. С. 1–5.